

El Magmatismo del sector de Atienza (Guadalajara): Cartografía geológica, estudio estructural, petrología y geoquímica y modelo de emplazamiento

Urbez Majarena Serrano



Trabajo Fin de Grado

Directores:

Dr. Marceliano Lago San José

Dr. Andrés Gil Imaz

Índice

| | |
|---|----|
| Resumen. | 1 |
| 1.- Planteamiento. | 2 |
| 2.- Objetivos. | 2 |
| 3.- Metodología | 3 |
| 4.- Contexto geológico | 4 |
| 5.- Presentación y discusión de los principales resultados obtenidos | 5 |
| 5.1.- Unidades pérmicas definidas | 5 |
| 5.1.1.- Sill subvolcánico | 5 |
| 5.1.2.- Diques | 5 |
| 5.1.3.- Brechas con intercalaciones de tobas | 6 |
| 5.1.4.- Limolitas rojas con intercalaciones de areniscas y conglomerado | 7 |
| 5.2.- Petrología y geoquímica de las rocas ígneas | 7 |
| 5.2.1.- Petrología | 7 |
| 5.2.1.1. Rocas volcánicas, subvolcánicas y diques | 7 |
| 5.2.1.2.- Enclaves metapelíticos | 9 |
| 5.2.2.- Química mineral | 9 |
| 5.2.2.1.- Feldespatos | 9 |
| 5.2.2.2.- Anfíboles | 10 |
| 5.2.2.3.- Biotitas | 12 |
| 5.2.2.4.- Piroxeno | 13 |
| 5.2.2.5.- Granate | 13 |
| 5.2.2.6.- Apatito | 14 |
| 5.2.2.7.- Minerales opacos | 14 |
| 5.2.3.- Geoquímica de roca total | 14 |
| 5.2.3.1.- Clasificación geoquímica y mineralogía normativa | 15 |
| 5.2.3.2.- Elementos mayores | 16 |
| 5.2.3.3.- Elementos traza | 18 |
| 5.3.- Discusión de los principales resultados obtenidos | 19 |
| 5.3.1.- Origen y evolución del magmatismo | 19 |
| 5.3.2.- Estructura y emplazamiento del magmatismo | 20 |
| 5.3.2.1.- Sill subvolcánico. | 20 |
| 5.3.2.2.- Diques | 21 |
| 5.3.2.3.- Unidad volcánica | 21 |
| 6.- Conclusiones | 23 |
| 7.- Bibliografía | 24 |

Abstract

The Atienza magmatism is formed by hypovolcanic and volcanic intermediate rocks of Lower Permian age. Previous studies were focused in a preliminary description of the magmatic rocks as a whole and the dating of the magmatism, proposing a radiometric age of 287 ± 12 Ma (Lower Permian).

The aim of this study is to characterize the petrology and geochemistry of the igneous rocks of this sector and to establish the geological relationships between the different igneous outcrops. The final objective of this study is to identify the origin, evolution and emplacement of the magmas during the Lower Permian.

There are two hypovolcanic sills in the studied area. The main sill is emplaced between the Silurian and Permian sequences and includes most of the identified subvolcanic outcrops. The second sill is smaller, located to the NW part of the studied area and emplaced into the Permian sedimentary sequence. In addition to these sills, some N-S trending dikes have been identified intruding the main sill in its northeastern part. On the other hand, the volcanic unit is composed by several levels of pyroclastic coarse-grained rocks with intercalations of fine-grained cinerites. The identified layers of these rocks indicate different volcanic pulses.

The studied rocks range from amphibole andesites to dacites with minor pyroxene andesites. The differences between hypovolcanic and volcanic rocks are related to the presence or absence of pyroclasts and fossil flora and to the nature of the matrix of the rocks, fine-grained or glassy and vacuole-rich. Metapelite xenoliths and xenocrysts of garnet are common in all the studied rocks.

According to the mineralogical and geochemical data, this magmatism is calc-alkaline and belongs to the SiO_2 -saturated series. Although all samples are similar, two compositional groups can be identified. The main group includes dikes and the bigger sill. The second group is formed by the sample of the small sill and the studied volcanic rock.

The evolution of the composition of the main mineral phases allow to recognized different magmatic processes: magmatic chamber recharge, fractional crystallization and assimilation of crustal xenoliths. Trace element composition of the rocks indicates the crustal influence in the origin of the magma.

Finally, the common presence of crustal xenoliths and xenocrystic garnets and overgrowth rims in amphibole indicate a rapid ascend of magma favored by deeper faults. The Bornova fault, located to the E of the main sill, could act as a feeder conduct of the magma to the emplacement level. The discontinuity between the Silurian and Permian was a favorable surface of emplacement of the magma.

1.- Planteamiento

Este estudio ha sido realizado por D. Urbez Majarena Serrano como Trabajo de Fin de Grado para la obtención del Grado de Geología en la convocatoria de Junio de 2015 (Universidad de Zaragoza). Ha sido co-dirigido por los Dres. Marceliano Lago San José y Andrés Gil Imaz, Profesores Titulares del Departamento de Ciencias de la Tierra (Facultad de Ciencias, Universidad de Zaragoza). Algunos de los resultados del presente trabajo han sido publicados por el autor en Majarena *et al.* (2015a, b y c).

Este trabajo comprende el estudio del magmatismo del Pérmico Inferior en el sector de Atienza (Guadalajara), con especial atención a los materiales subvolcánicos. En su desarrollo se han empleado las metodologías propias del trabajo de campo y de laboratorio así como de la petrología, geoquímica, mineralogía y geología estructural.

En el sector de Atienza se encuentran un conjunto de afloramientos de un magmatismo andesítico, emplazado en el Pérmico Inferior en forma de intrusiones subvolcánicas y de manifestaciones volcánicas superficiales. Las diferencias petrológicas y de emplazamiento sugieren la presencia de varios eventos magmáticos.

La realización de una cartografía geológica y estudio de campo de los afloramientos junto con el estudio petrológico, geoquímico y estructural de los mismos puede permitir establecer la relación entre dichos afloramientos y reconstruir los procesos magmáticos que tuvieron lugar.

2.- Objetivos

Este trabajo tiene por finalidad estudiar las manifestaciones magmáticas del sector de Atienza (Guadalajara). Para lograrlo se plantean los siguientes objetivos:

- Cartografía geológica del sector, haciendo especial hincapié en los afloramientos ígneos.
- Establecimiento de las relaciones entre los distintos afloramientos.
- Caracterización petrológica y geoquímica del magmatismo.
- Estudio del origen de los magmas y reconstrucción de los procesos magmáticos.
- Establecimiento de un modelo de emplazamiento.

3.- Metodología

La metodología ha contemplado trabajo de campo, de laboratorio y de gabinete. El trabajo realizado parte de una revisión bibliográfica de los estudios geológicos previos sobre la zona (entre otros, Ancochea *et al.*, 1981; Hernando *et al.*, 1980; Lago *et al.*, 2004; Pérez Mazario, 1990; Virgili, 1980).

A continuación se ha llevado a cabo la cartografía geológica de la totalidad del área correspondiente a la hoja 433-IV ("Atienza") del Mapa Topográfico Nacional a escala 1:25.000 (IGN, 1995), en la que se encuentran todos los afloramientos ígneos identificados.

Los materiales pérmicos, y dentro de ellos especialmente aquellos de naturaleza ígnea, han sido cartografiados en detalle mediante trabajo de campo, imagen satélite y fotografía aérea a escala 1:10.000, y en los casos de mayor complejidad a 1:5.000. El resto de materiales han sido cartografiados a escala 1:25.000 con ayuda de ortoimágenes y fotografía aérea, partiendo del trabajo realizado por Gabaldón *et al.* (1978). La síntesis del trabajo cartográfico realizado queda reflejada en el mapa geológico del anexo 1 y los cortes geológicos del anexo 2 de la presente memoria.

Tras la cartografía se ha realizado la descripción de todos los afloramientos ígneos, atendiendo especialmente a sus características petrológicas y a los materiales sedimentarios encajantes. Además se ha llevado a cabo un muestreo sistemático de las rocas ígneas, que junto al realizado anteriormente por Lago *et al.* (2004), ha permitido tener muestras representativas de cada unidad diferenciada petrológicamente en cada uno de los afloramientos. Estas muestras han sido estudiadas y clasificadas a escala de muestra de mano y mediante el microscopio petrográfico.

Posteriormente se han realizado análisis de microsonda electrónica en el centro el Centro Nacional de Microscopía Electrónica "Luis Bru" (UCM) y estudiado las características composicionales y evolución magmática de los cristales que integran las rocas estudiadas.

También se han llevado a cabo análisis geoquímicos de roca total en el Laboratorio de Geocronología y Geoquímica Isotópica "Ibercron" (UPV). Los elementos mayores y algunos trazas se analizaron mediante espectrometría de emisión atómica (ICP-AES) y las tierras raras mediante un espectrómetro de masas con fuente de plasma acoplado inductivamente (ICP-MS). Estos resultados, junto con los análisis previos facilitados por el Dr. M. Lago, han permitido establecer las similitudes y diferencias composicionales entre los distintos afloramientos presentes en el área, la clasificación geoquímica de las rocas y la afinidad y origen de los magmas.

Finalmente todos estos datos han sido convenientemente tratados mediante *software* específico (dibujo y cartografía vectorial, hojas de cálculo, representación gráfica, etc.) e integrados para conocer la estructura y disposición espacial y relación entre los afloramientos ígneos, y caracterizar el magmatismo que los formó.

4.- Contexto geológico

El área de estudio se localiza en la zona de contacto entre el Sistema Central y la Cordillera Ibérica (Fig. 1). Desde el punto de vista geológico en este sector se diferencian tres unidades litoestructurales principales.

Una primera unidad paleozoica, en el sector sur, formada por materiales ordovícicos y silúricos pertenecientes al extremo SE del Dominio del Olla de Sapo de la Zona Centro Ibérica del Macizo Ibérico (Martínez Catalán *et al.*, 2004) que se disponen en un gran sinclinal de orientación NNE-SSW. Este sinclinal forma parte, a su vez, del anticlinorio de Hiendelaencina, estructura varisca resultado de varias etapas de deformación (Gabaldón *et al.*, 1978), en cuyo flanco N se encuentran los materiales paleozoicos de la zona de estudio.

La segunda unidad, zona central del sector estudiado, está formada por los materiales pérmicos, dispuestos discordantemente sobre las unidades silúricas. Salvo en el sector más oriental, se estructuran en un sinclinal (Sinclinal de Cañamares) de orientación NW-SE.

La tercera unidad está representada por la serie triásica que forma parte de la Rama Castellana de la Cordillera Ibérica, apoyada en discordancia angular sobre cualquier unidad anterior y con una directriz estructural NE-SW.

Los afloramientos ígneos se sitúan en la base de la segunda unidad y están formados por andesitas de edad Pérmico Inferior (Hernando *et al.*, 1980, Lago *et al.*, 2004 y 2005). Su emplazamiento se enmarca dentro de la extensión generalizada pérmica, que tuvo lugar tras la orogenia Hercínica. Esta extensión generó profundas fracturas direccionales y normales, de alcance cortical, que condujeron a la formación de pequeñas cuencas de tipo “pull-apart”, grabens, y semigrabens fuertemente subsidentes (Gabaldón *et al.*, 1978; Ancochea *et al.*, 1981; Pérez, 1990). Desde el punto de vista petro-estructural la extensión tardihercínica produjo un importante adelgazamiento cortical y el ascenso del material ígneo a favor de conductos preferentes (Lago *et al.*, 2004 y 2005).

En la zona estudiada destaca la falla Bornova (Hernando, 1980), de orientación NNE-SSW, y, en la prolongación noroccidental inmediata de esta zona, la Falla de Somolinos (Gabaldón *et al.*, 1978), de orientación NW-SE. Se trata de dos accidentes de alcance regional que seguramente estaban ya activos durante el Pérmico, controlando la sedimentación durante este periodo y permitiendo el ascenso magmático.

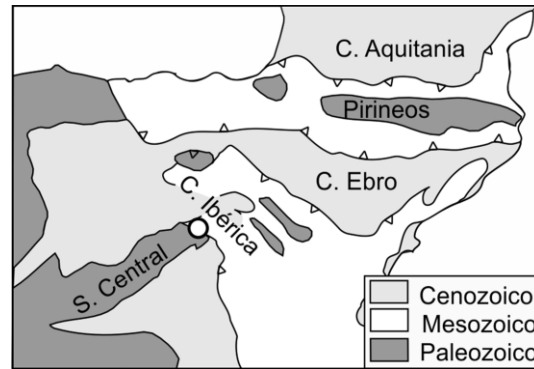


Fig. 1. Mapa de situación del área de estudio de Atienza. Su posición se indica mediante un círculo.

5.- Presentación y discusión de los principales resultados obtenidos

5.1.- Unidades pérmicas definidas

5.1.1.- Sill subvolcánico

Está compuesto por andesitas y daciandesitas y tiene una potencia variable desde unos 75 m en los afloramientos más occidentales, hasta más de 150 m en los más orientales, en el entorno de los municipios de La Miñosa y Alpedroches (Anexo 1).

Presenta un diaclasado muy variable en los distintos afloramientos, combinando fracturas tectónicas y otras asociadas a disyunción columnar. La orientación de estas discontinuidades muestra una fuerte variación aunque en muchos casos sistemática.

A escala de muestra de mano las rocas menos alteradas presentan una elevada cristalinidad, brillo vítreo y cristales fácilmente distinguibles de hasta 3 mm (Fig. 2). El mineral más abundante es la plagioclasa, aunque destacan por su color negro la biotita y el anfíbol. Éstos se presentan aislados y resultan fácilmente distinguibles entre sí por su hábito laminar y prismático en sección basal (biotita) o alargado y rómbico en sección basal (anfíbol).



Fig. 2. Aspecto a escala de muestra de mano de una muestra de roca subvolcánica.

Son muy frecuentes los enclaves andesíticos y metapelíticos de tamaño centimétrico, así como los xenocristales de granate. Los enclaves andesíticos son angulosos y de color más oscuro que el de la roca encajante. En los enclaves metapelíticos destacan las biotitas, las cuales son, a escala de muestra de mano, su mineral mayoritario y a veces el único reconocible. En otras ocasiones, junto a las biotitas se encuentran numerosos granates de tamaño comprendido entre 0,2 y 0,5 mm. Estos mismos granates aparecen en ocasiones aislados como xenocristales, y con una visible corona.

5.1.2.- Diques

En el afloramiento de Alpedroches, el sill se encuentra atravesado por un conjunto de diques de color gris oscuro, de potencia comprendida entre 0,5 y 5 m (Fig. 3), dirección dominante N-S (Fig. 4) y buzamiento variable, aunque subvertical en los de mayor entidad (Fig 3). A escala de muestra de mano no es posible identificar sus minerales.

También se ha identificado un dique de naturaleza andesítica y potencia métrica intruyendo a la serie silúrica al W de la Miñosa, y otro de naturaleza dacítica próximo a la falla que separa los dos afloramientos ígneos más orientales del área estudiada.



Fig. 3. Aspecto a escala de muestra de mano de una muestra de roca subvolcánica.

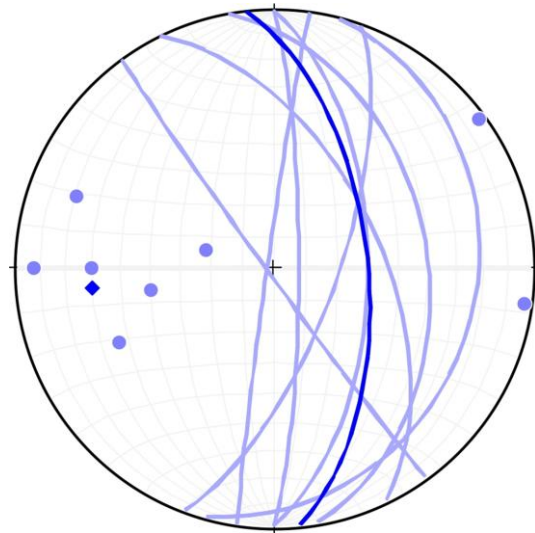


Fig. 4. Proyección estereográfica de la orientación de los diques.

5.1.3.- Brechas volcánicas con intercalaciones de tobas

Esta unidad aflora al W y SW de Cañamares. Presenta una marcada estratificación, su potencia es de unos 75 m. y está constituida por dos tipos de rocas: brechas tobáceas y cineritas (Fig. 5A). En los afloramientos situados al S, la extensión lateral de la unidad volcánica está condicionada por la presencia de una zona falla (Anexo 1).

Las brechas tobáceas están formadas por andesitas de similar composición a las subvolcánicas. Presentan una matriz vítrea, tienen un color gris verdoso. Contienen numerosos piroclastos de tamaño centimétrico (Fig. 5B), fragmentos de andesita redondeados de tamaño decimétrico y, ocasionalmente, restos de paleoflora formados por tallos vegetales centimétricos a decimétricos y que son típicos de la flora autuniense (Lago *et al.*, 2004).

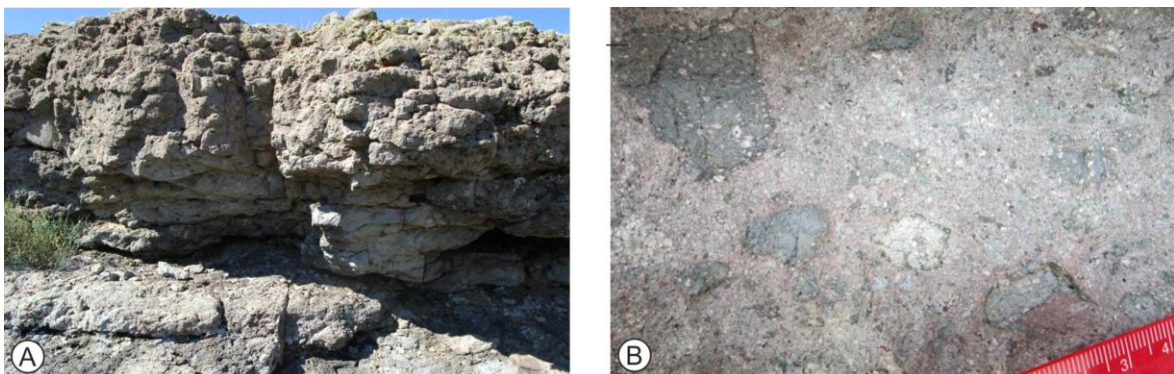


Fig. 5. Aspecto general de los depósitos de brechas tobáceas (A) y detalle de los piroclastos que contienen (B).

Se disponen en estratos de espesor decimétrico y métrico (Fig. 5A). Su potencia decrece en el techo de la serie hacia el NW. Los estratos tienen base irregular y erosiva, no

muestran estructuras internas marcadas, presentando, en general, un aspecto caótico y masivo. En ocasiones se distinguen dentro de ellos niveles de piroclastos y cierta granoselección positiva, con los bloques y piroclastos de mayor tamaño en la parte basal. Pueden incluir enclaves metapelíticos y xenocristales de granate, con las mismas características a las descritas en la unidad subvolcánica.

Los niveles de cineritas tienen potencia entre centimétrica y decimétrica, y color gris muy oscuro. Su tamaño de grano es muy pequeño, de forma que solo algunos de los cristales más grandes son visibles a simple vista. No presentan piroclastos gruesos.

Pese a que la serie volcánica es bastante monótona en su sucesión estratigráfica y composición petrológica, la erosión diferencial entre distintos niveles de brechas es notable, evidenciando la ocurrencia de sucesivos eventos volcánicos.

5.1.4.- Limolitas rojas con intercalaciones de areniscas y conglomerados

La serie sedimentaria pérmica está constituida por limolitas rojas con intercalaciones de areniscas y conglomerados, y su espesor máximo aflorante es aproximadamente unos 1200 m. Las limolitas tienen un tamaño de grano pequeño, color rojo intenso y estructuras de laminación paralela y ocasionalmente cruzada.

Entre ellas se intercalan esporádicamente estratos de areniscas de entre 10 cm y más de 1 m de potencia, especialmente abundantes y de mayor espesor hacia la parte media de la serie. Los estratos de arenisca son predominantemente de color blanco, aunque también los hay rojos y marrones. Contienen, además de componentes de origen sedimentario, otros procedentes de rocas ígneas (biotita, moscovita, posiblemente feldespato) especialmente visibles en los estratos de color blanco. Su tamaño de grano varía desde muy fino a grueso. Se encuentran fuertemente cementadas por carbonatos. Presentan cantos cuarcíticos y pizarrosos, y en ocasiones una gran bioturbación por raíces, indicativa del desarrollo de paleosuelos.

Los conglomerados, intercalados entre las areniscas, son especialmente frecuentes hacia la parte alta de la serie y su potencia es de varios metros. Su morfología es canaliforme, aunque en ocasiones tienen una amplitud superior a la del afloramiento y no es evidente. A techo de la serie están formados predominantemente por cantos redondeados cuarcíticos de tamaño centimétrico a decimétrico. En el resto de la serie están constituidos por cantos centimétricos angulosos; predominantemente de hábito planar y pizarrosos, aunque también contienen cantos de areniscas y cuarcitas.

5.2.- Petrología y geoquímica de las rocas ígneas

5.2.1.- Petrología

5.2.1.1. Rocas volcánicas, subvolcánicas y diques

Se han muestreado y estudiado todos los afloramientos ígneos. Todas las muestras presentan una asociación mineral común y unas características de los fenocristales

similares. Las variaciones corresponden a la matriz, a la abundancia de los distintos minerales y al grado de alteración. Por su composición podemos distinguir entre andesitas anfibólicas, andesitas piroxénicas y daciandesitas. Generalmente, los fenocristales representan el 40 % de la muestra y la matriz el porcentaje restante (60%).

Las andesitas anfibólicas (Fig. 6) son las rocas más abundantes. Están formadas por plagioclasa (55%), anfíbol (30%), biotita (13%) y granate, cuarzo y apatito como minerales accesorios (2%). Las andesitas piroxénicas muestran una composición similar a las anteriores pero se diferencian de ellas por la presencia piroxeno (10%) y una menor proporción de anfíbol (20%). Finalmente, las daciandesitas se caracterizan por una mayor proporción de plagioclasa, menor de anfíbol y biotita y la ausencia de piroxeno, respecto a las andesitas.

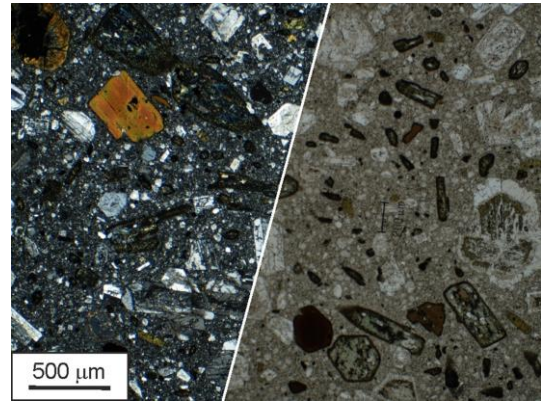


Fig. 6. Aspecto al microscopio de las andesitas anfibólicas subvolcánicas en nícoles cruzados (derecha) y paralelos (derecha).

En cuanto a la textura de su matriz pueden diferenciarse dos grandes tipos. Las muestras subvolcánicas muestran una matriz microcristalina equigranular, formada predominantemente por plagioclasa y minerales opacos. Presentan grados de alteración muy variable. Sin embargo, las rocas volcánicas muestran una matriz formada por vidrio muy alterado y frecuentemente contienen vacuolas.

Los fenocristales de plagioclasa de todas estas rocas tienen un tamaño comprendido entre 0,2 y 3,2 mm, siendo su tamaño medio 0,8 mm. Son mayoritariamente subidiomorfos, aunque también abundan los alotriomorfos; los cristales idiomorfos son ocasionales. Suelen mostrarse fuertemente zonados.

Los cristales de anfíbol presentan un tamaño de entre 0,2 y 2,2 mm, siendo su tamaño medio 0,6 mm. Se encuentran frecuentemente muy alterados, de forma que en algunos casos solo se conserva su morfología. Varían de subidiomorfos a alotriomorfos.

Los fenocristales de biotita tienen un tamaño medio de 0,8 mm. Sólo se observan cristales idiomorfos correspondientes a secciones basales que contienen pequeñas inclusiones. Los cristales de mayor tamaño son subidiomorfos y tienen una marcada foliación y pleocroísmo. Los cristales pequeños son alotriomorfos.

Los fenocristales de piroxeno son subidiomorfos y más pequeños que las plagioclasas, los anfíboles y la mayor parte de las biotitas, variando entre 0,2 y 1,2 mm.

El apatito aparece como pequeños cristales dentro de la matriz y el cuarzo en forma de aislados cristales alotriomorfos de un tamaño aproximado de 0,8 mm. Los granates alcanzan tamaños de varios milímetros y se presentan aislados. Suelen presentar zonados.

5.2.1.2.- Enclaves metapelíticos

Los enclaves metapelíticos tienen siempre entre sus minerales principales la biotita, incluyendo también proporciones variables de plagioclasa, granate y sillimanita. Están fuertemente reabsorbidos, sus bordes son muy irregulares y ocasionalmente interdigitados con las andesitas que los contienen. (Fig. 7).

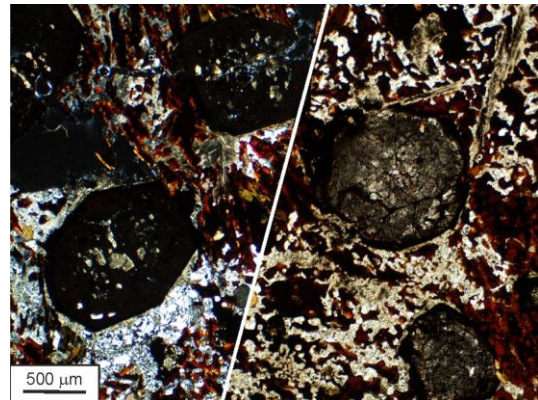


Fig. 7. Aspecto al microscopio de un enclave metapelítico en nicoles paralelos (izquierda) y cruzados (derecha).

La biotita está presente de dos formas. Puede tener un aspecto masivo, en cristales de tamaño muy variable y hasta centimétrico, y con una birrefringencia marrón-granate muy oscura; o bien puede mostrar una foliación muy marcada, con cristales definidos, birrefringencia en tonos más claros y fuerte pleocroísmo. Los granates se encuentran en gran proporción en algunos de estos enclaves, mientras que están ausentes en otros. La sillimanita es accesoria en algunos enclaves. Finalmente, la plagioclasa se muestra entre los diferentes minerales mencionados anteriormente.

5.2.2.- Química mineral

A continuación se exponen las características composicionales de los minerales presentes en el sill subvolcánico de Atienza y los diques del afloramiento de Alpedroches. Los análisis representativos de los distintos minerales se muestran en anexo 3.

5.2.2.1.- Feldespatos

Se han realizado cerca de 300 análisis en cristales de feldespato, pertenecientes a distintos afloramientos del sill subvolcánico y a 3 de los diques de Alpedroches. La fórmula estructural de los feldespatos ha sido calculada a 8 oxígenos.

Los fenocristales analizados tienen una composición variable de bytownita, labradorita y andesina (An_{60-36} Ab_{40-61} Or_{1-3} ; Fig. 8). Muestran un zonado oscilatorio ligado a variaciones de Ca y Na (Fig. 9), que responde a lo observado al microscopio. Algunos bordes de esos fenocristales y los microcristales de la matriz analizados tienen una composición de andesina y oligoclasa (An_{32-23} Ab_{62-71} Or_{2-4}). También se han identificado microcristales de sanidina (An_{0-10} Ab_{20-60} Or_{35-65}) en la matriz.

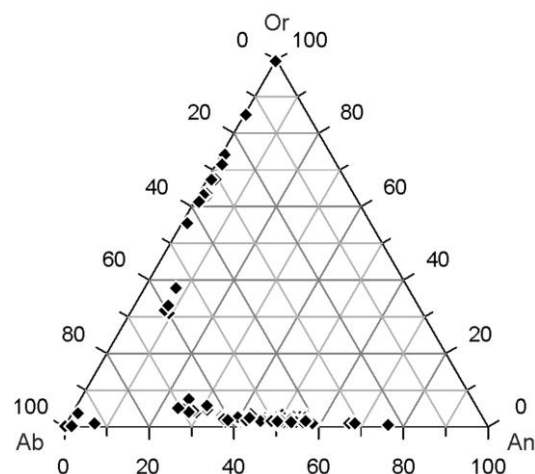


Fig. 8. Clasificación de los feldespatos analizados

Algunos cristales alterados muestran composiciones de ortosa y de albita ($Ab > 90\%$; Fig. 8).

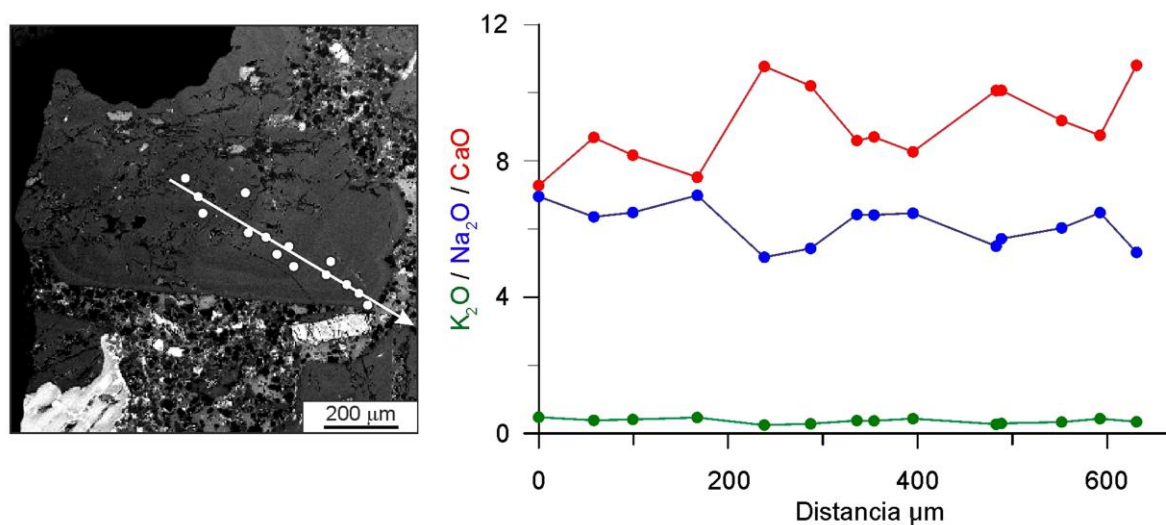


Fig. 9. Variaciones composicionales de centro a borde en un cristal de plagioclasea con zonado oscilatorio. A la izquierda se muestra la posición de los puntos analizados y a la derecha su contenido en K_2O , Na_2O y CaO .

5.2.2.2.- Anfíboles

Para el estudio composicional de los anfíboles se han realizado cerca de 250 análisis en 7 muestras, 3 de ellas correspondientes a los diques del sector de Alpedroches y el resto al sill. La fórmula estructural de los minerales analizados así como su contenido en Fe^{2+} y Fe^{3+} por fórmula unidad han sido calculados siguiendo la propuesta de Leake *et al.* (1997).

Todos los análisis corresponden a anfíboles cálcicos ($[Ca+Na]_B \geq 1$; $Na_B < 0,5$) de tipo pargasita, Mg-hastingsita y tschermakita según la clasificación de Leake *et al.* (1997) (Fig 10).

Dentro de los análisis realizados se han establecido tres grandes grupos composicionales. El primero corresponde a los núcleos de algunos fenocristales. Está poco representado y se ha observado en su gran mayoría en la muestra del afloramiento de La Miñosa. Tiene composición dominante de pargasita (Fig. 10) y el parámetro mg^* varía entre 0,66 y 0,72. Se caracteriza por un bajo contenido de SiO_2 (40,5-42%), altos contenidos de Al_2O_3 y CaO (14-15,5% y 11-11,5%, respectivamente; Fig. 11) y un rango pequeño de variación del Na_2O (2-2,5%).

El segundo grupo aparece rodeando al anterior o formando el núcleo de otros fenocristales. Es mucho más abundante que el anterior y tiene composición de pargasita, Mg-hastingsita y secundariamente, tschermakita. Se caracteriza por valores de mg^* más elevados (0,66-0,93). Su contenido en SiO_2 es similar al grupo anterior (40,5-42%), mientras que Al_2O_3 , CaO y Na_2O presentan una mayor variación composicional (12-15,5%, 10,5-12% y 1,9-2,6%, respectivamente; (Fig. 11). El valor de mg^* y el contenido en CaO y Na_2O disminuyen hacia el exterior de esta zona composicional.

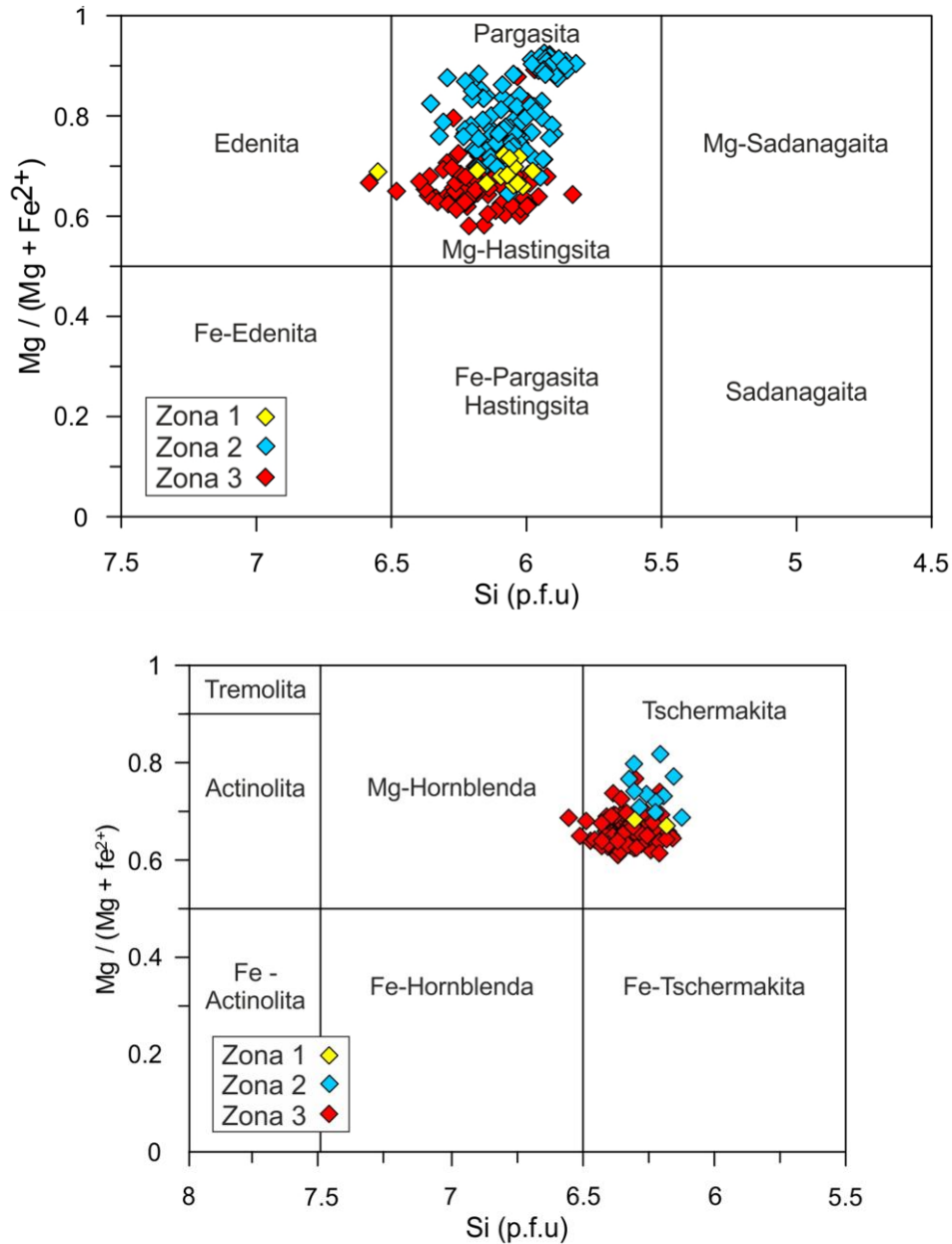


Fig. 10. Clasificación de los anfíboles según la metodología propuesta en Leake *et al.* (1997) y revisada por Leake *et al.* (2004). Arriba, anfíboles con Na+K > 0.5 y Ti < 0.5. Abajo, Anfíboles con Na+K < 0.5. Todos los valores referidos a átomos por fórmula unidad.

El tercer grupo rodea a la zona composicional anterior en la mayoría de los casos, y constituye la parte externa y los bordes de la mayoría de los cristales estudiados. Integra composiciones de tschermakita, Mg-hastingsita y, secundariamente, pargasita. Tiene los valores de mg^* más bajos (0,58-0,74) y también presenta los contenidos más bajos en Al_2O_3 , CaO y Na_2O (10-15%, 9,5-11,5% y 1,6-2,8%, respectivamente; Fig. 11), que disminuyen hacia el borde de los cristales. Por el contrario, el contenido en SiO_2 aumenta hacia el borde, siendo el mayor de los 3 grupos establecidos (42-44%).

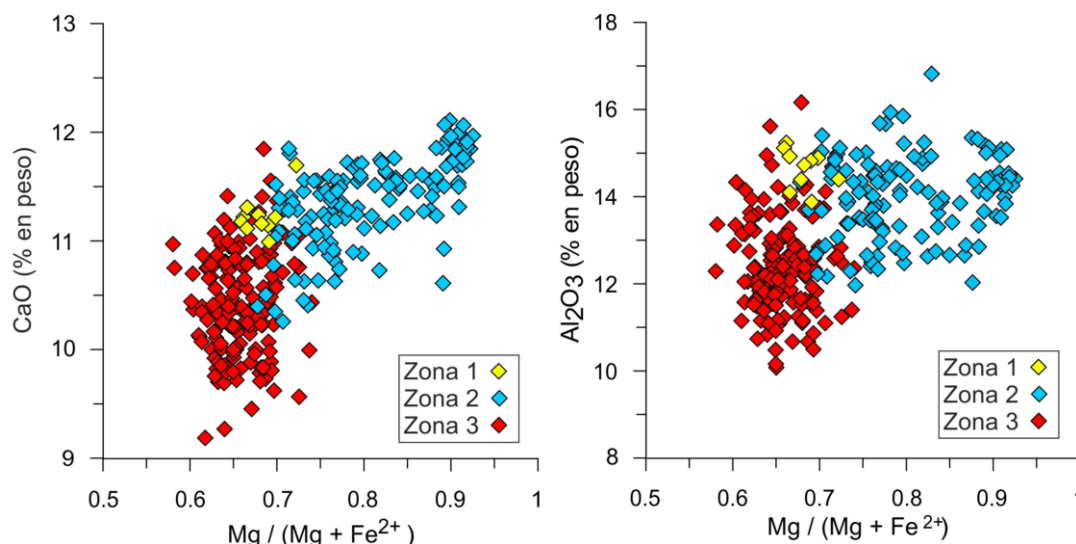


Fig. 11. Porcentaje en peso de CaO y Al_2O_3 , y valor del parámetro Mg^* ($\text{Mg} / (\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$) de los análisis pertenecientes a cada zona composicional.

5.2.2.3.- Biotitas

Se han realizado cerca de 250 análisis en cristales de biotitas pertenecientes a 16 muestras del sill y los diques de Alpedroches.

Se encuentran biotitas tanto de origen ígneo como metamórfico. Dentro de las de origen ígneo se identifican varios grupos composicionales y petrográficos. El primero está formado mayoritariamente por fenocristales subidiomorfos de hasta 2 mm. Son las biotitas más ricas en Fe (Fe^* ($\text{Fe}^{2+}/[\text{Fe}^{2+} + \text{Mg}]$): 0,41 - 0,5). El segundo grupo composicional lo integran los bordes de los fenocristales y los microcristales. Este grupo evidencia una evolución desde composiciones de biotita próximas al primer grupo hasta composiciones de flogopita, más ricas en Mg y con menor Al^{IV} (Fig. 12). El tercer grupo ígneo está formado cristales alotriomorfos de entre 1 y 2 mm con numerosas venillas de alteración. Son más ricos en Mg y mayoritariamente se trata de flogopitas (Fig. 12).

Dentro de las biotitas de origen metamórfico se han distinguido tres tipo petrográficos que presentan pequeñas variaciones composicionales. Su origen metamórfico se debe a que están formados en su mayor parte por cristales de enclaves metapelíticos. El primer tipo corresponde a biotitas alotriomorfas fuertemente afectadas por procesos de asimilación magmática. Su tamaño es variable, desde cristales milimétricos hasta otros que por su continuidad óptica parecen centimétricos. Su composición es de biotita, con un rango de Fe^* de 0,40 a 0,48 (Fig 12). El segundo grupo está formado por cristales subidiomorfos o alotriomorfos con una foliación muy marcada, un color más claro y un tamaño más reducido (0,4-2 mm) al del grupo anterior. Su composición es de biotita algo más magnesiana que en el grupo anterior (Fe^* : 0,35-0,48). Finalmente, el tercer grupo está formado por inclusiones de biotita en cristales de granate y tiene unas características muy similares al primero, aunque dos de los cristales analizados se diferencian claramente del resto de cristales por su composición mucho más rica en hierro (Fe^* : 0,61).

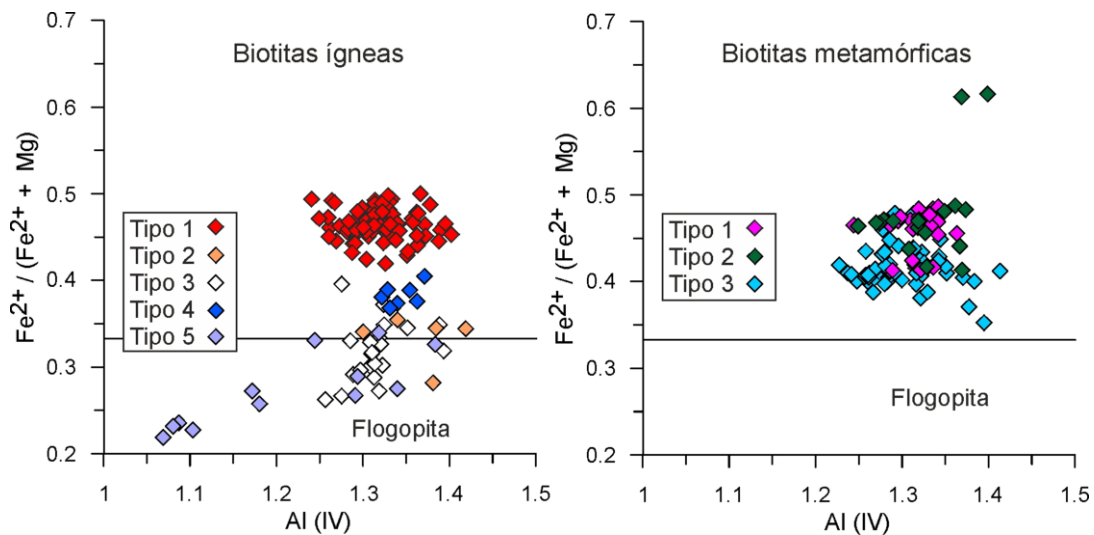


Fig. 12. Clasificación de las biotitas. Diagrama de la izquierda (biotitas ígneas): Tipo 1, fenocristales; tipo 2 bordes de fenocristales; tipo 3, fenocristales alterados; tipo 4; centro de microcristales; y tipo 5 borde de microcristales. Diagrama de la derecha (biotitas metamórficas): Tipo 1, grandes cristales reabsorbidos; tipo 2, cristales con marcada foliación; y tipo 3 inclusiones en granates.

5.2.2.4.- Piroxeno

Se han realizado 41 análisis de piroxeno en 2 muestras del sill subvolcánico. Todos los análisis corresponden a ortopiroxenos con gran similitud composicional ($\text{En}_{54-49} \text{Fs}_{46-51} \text{Wo}_{1-2}$).

5.2.2.5.- Granate

Se han realizado 84 análisis en granates pertenecientes a 8 muestras recogidas en distintos afloramientos del sill subvolcánico, algunos de ellos corresponden a xenocristales y otros forman parte de los xenolitos de metapelita. Su fórmula estructural ha sido calculada a 24 oxígenos y el contenido en Fe^{2+} y Fe^{3+} ha sido establecido mediante el método de Droop (1987).

Los xenocristales estudiados son subidiomorfos y tienen bordes netos, algo redondeados. Presentan una zonación textural clara, con una parte interna de aspecto moteado y parcialmente reabsorbido y una parte externa limpia, con inclusiones de apatito y minerales opacos. En un caso se ha podido observar un zonado algo más complejo, en donde la zona externa consta de dos sectores de morfología irregular. En base a este ejemplo se han establecido tres zonas (Fig. 13): 1 (interna), 2 (intermedia) y 3 (externa).

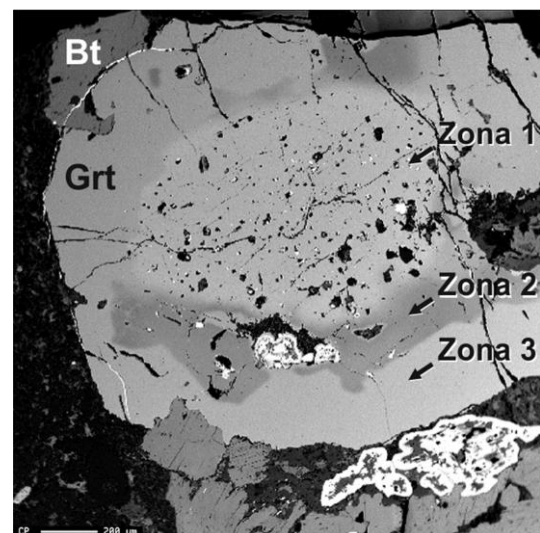


Fig. 13. Imagen de electrones retrodispersados de un xenocristal de granate zonado. Grt: granate, Bt: biotita.

El granate de los xenolitos aparece en forma de agregado policristalino o de porfiroblasto rodeado de biotita. Suele mostrar evidencias de desestabilización o reacción en sus bordes, sobre todo en los xenolitos disgregados y también se observa la zonación textural definida.

En todos los casos se trata de granates de tipo almandino ricos en FeO (> 23%) y pobres en MnO (<4%). Los xenocristales tienen una composición variable ($\text{Alm}_{72-50} \text{Prp}_{39-17} \text{Grs}_{17-6} \text{Sps}_{5-0}$) y muestran una zonación composicional destacada en cuanto a su contenido en Fe, Mg y Ca (Fig. 14), coherente con la definida petrográficamente. Así, la zona 1 tiene el contenido más elevado en Fe y los contenidos más bajos de Mg y Ca ($\text{Alm}_{72-69} \text{Prp}_{20-17} \text{Grs}_{12-6} \text{Sps}_2$). La zona 2 es rica en Mg y pobre en Fe y Ca ($\text{Alm}_{54-50} \text{Prp}_{39-36} \text{Grs}_{12-6} \text{Sps}_0$). Finalmente, la zona 3 tiene contenidos en Fe y Mg moderados y es rica en Ca ($\text{Alm}_{65-59} \text{Prp}_{22-17} \text{Grs}_{17-10} \text{Sps}_{4-2}$).

Los granates de los xenolitos también muestran una composición variable ($\text{Alm}_{73-55} \text{Prp}_{31-14} \text{Grs}_{16-3}$), con una zonación similar a la de los xenocristales. En este caso, la mayor parte de los cristales tienen una composición similar a la de la zona 1 ($\text{Alm}_{73-65} \text{Prp}_{30-14} \text{Grs}_{11-3}$). En los enclaves disgregados, la zona 1 está rodeada de una envuelta similar a la zona 3 ($\text{Alm}_{65-60} \text{Prp}_{27-18} \text{Grs}_{16-13}$), salvo en un caso donde presenta un borde similar a la zona 2 ($\text{Alm}_{55} \text{Prp}_{35} \text{Grs}_{12}$).

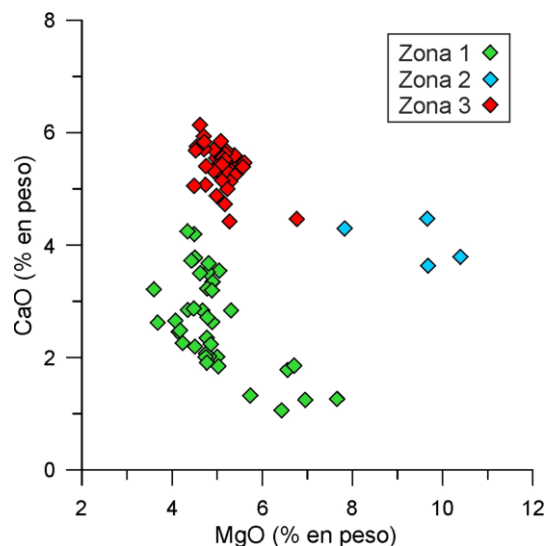


Fig. 14. Porcentaje en peso de CaO y MgO en los distintos análisis de granates granates.

5.2.2.6.- Apatito

Se han realizado 22 análisis en cristales de Apatito, correspondientes a 4 muestras del sill y 1 de los diques de Alpedroches. Su fórmula estructural ha sido calculada a 13 oxígenos equivalentes, de los cuales 1 corresponde a los aniones F, Cl y OH⁻, permitiendo determinar indirectamente el contenido en OH⁻.

La proporción entre los tres aniones ha permitido clasificar los apatitos analizados como fluorapatitos.

5.2.2.7.- Minerales opacos

Dentro de los minerales opacos la mayoría corresponden a ilmenita y rutilo, aunque de forma puntual también se ha encontrado magnetita y titanomagnetita en coronas rodeando a los anfíboles.

5.2.3.- Geoquímica de roca total

Se han realizado análisis de elementos mayores y traza de 10 rocas que completan los datos existentes anteriormente en otras 6 muestras de trabajos anteriores (Lago *et al.*, 2004). De las 16 muestras 2 corresponden a diques de Alpedroches, 1 a la matriz de los depósitos

volcánicos en la que se encuentran los piroclastos, y el restos a los distintos afloramientos del sill. Los datos composicionales completos se muestran en el anexo 4. Además, en todas las rocas se ha calculado la norma CIPW.

5.2.3.1.- Clasificación geoquímica y mineralogía normativa

Las rocas estudiadas se clasifican como andesitas, dacitas, traquiandesitas y traquidacitas en el diagrama TAS (LeBas *et al.*, 1986; Fig. 15). Dado que se trata de rocas antiguas, se han clasificado también mediante el diagrama SiO_2 vs Nb/Y (Winchester & Floyd, 1977; Fig. 15) resultando mayoritariamente traquiandesitas, aunque también hay traquitas y una andesita.

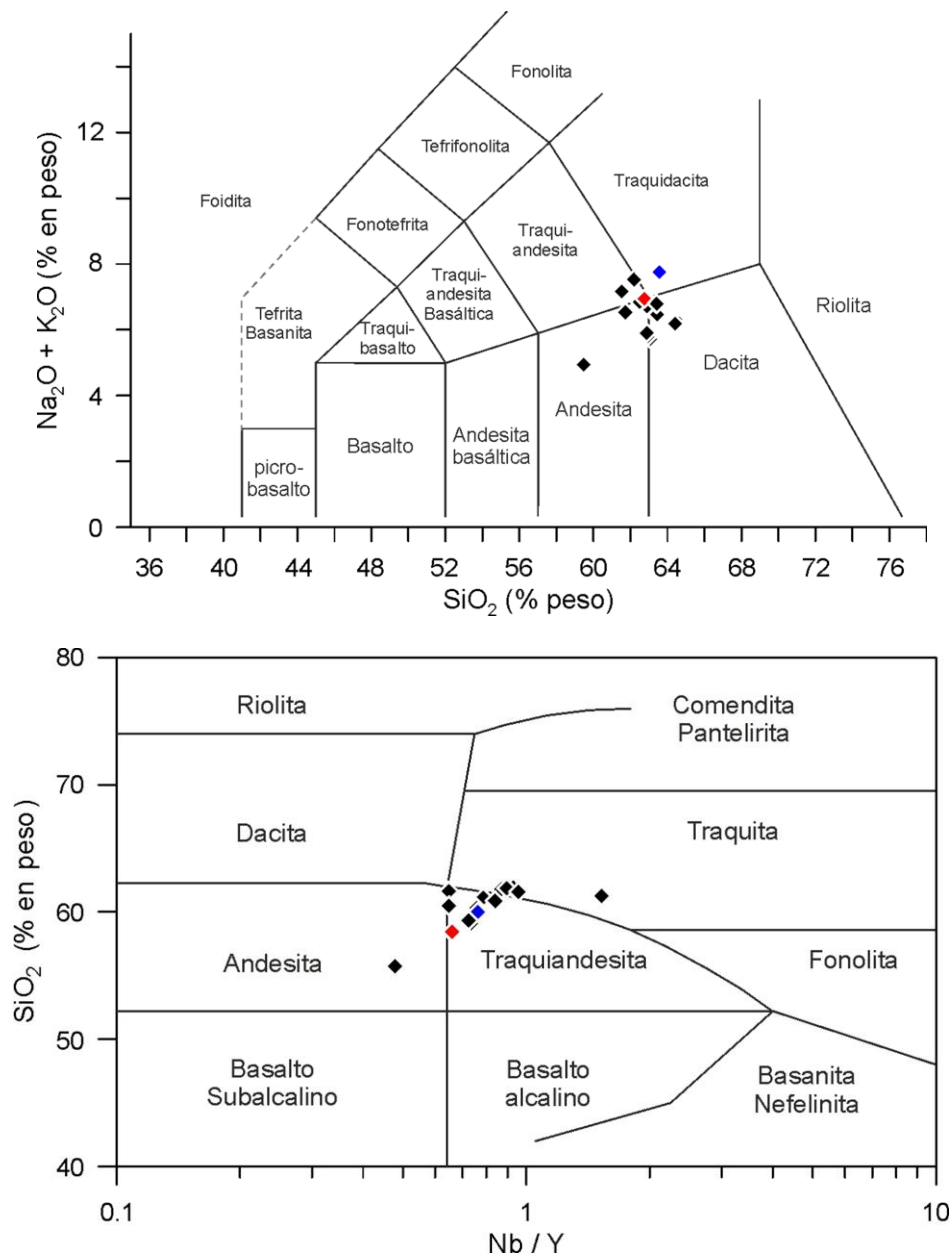


Fig. 15. Clasificación de las rocas según el diagrama TAS (gráfico superior) de Le Bas *et al.* (1986), y según el Diagrama SiO_2 vs Nb/Y de Winchester & Floyd (1977) para rocas volcánicas antiguas (gráfico inferior). En azul se representa la muestra ATU-A3, en rojo la ATU-A8, y en negro el resto de muestras analizadas.

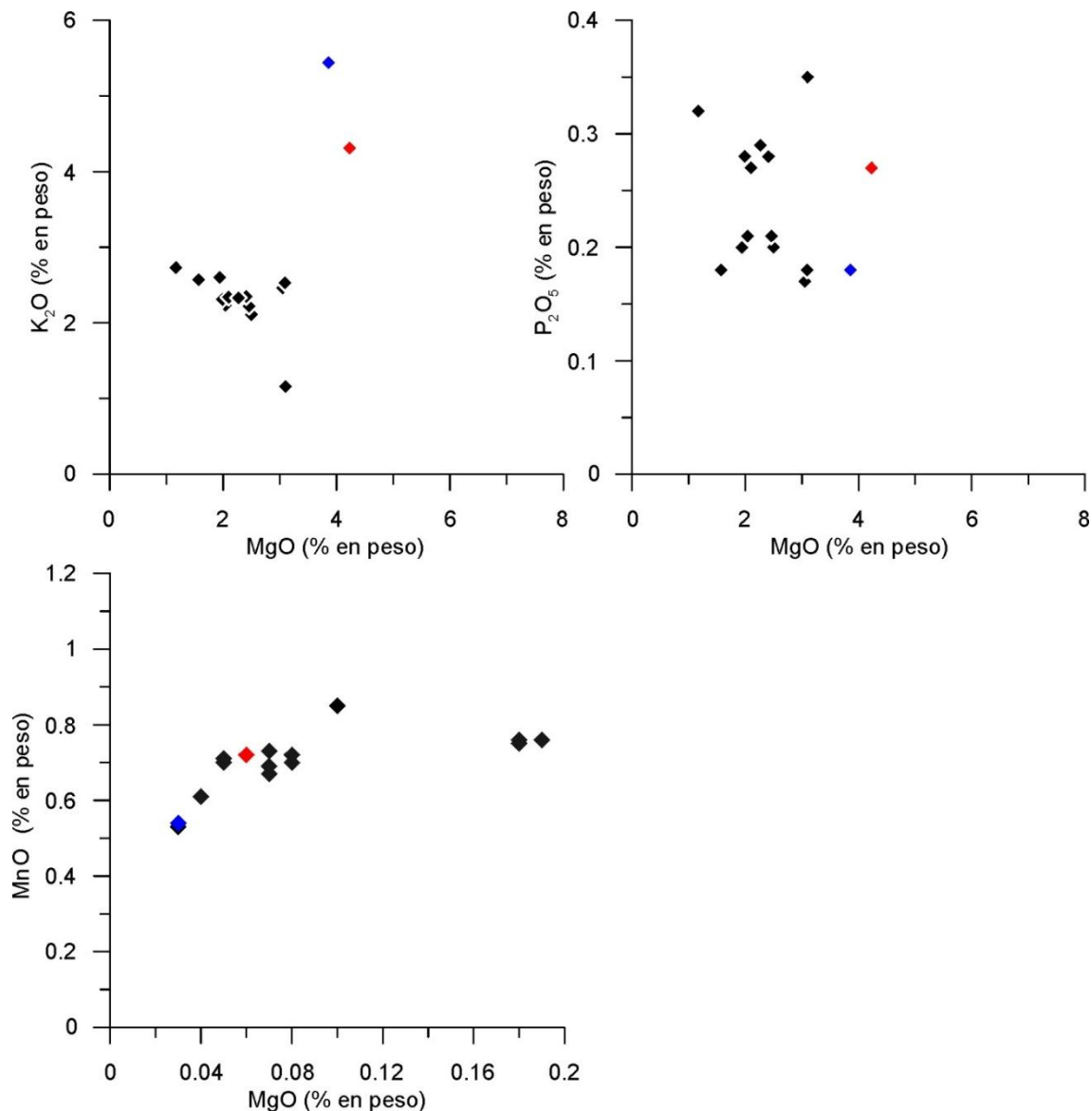
Todas las rocas tienen una mineralogía normativa similar, siendo ricas en cuarzo, plagioclasa, ortoclasa e hiperstena normativas. Sin embargo la abundancia relativa de estos minerales permite identificar dos grupos (Tabla 1): un primer grupo integrado por la mayoría de las rocas estudiadas y un segundo grupo integrado por la muestra de la unidad volcánica (ATU-A8) y la del afloramiento subvolcánico más noroccidental, que queda rodeado por la serie pérmica sedimentaria (ATU-A3).

| Min. normativos | Grupo 1 | Grupo 2 |
|-----------------|---------|---------|
| Cuarzo | 9-20% | 18-19% |
| Plagioclasa | 49-61% | 25-26% |
| Ortosa | 7-16% | 27-34% |
| Hiperstena | 8-16% | 15-18% |
| Corindón | 0-3% | 6% |
| Ilmenita | 1-2% | 1% |
| Magnetita | 1% | 1% |

Tabla 1. Composición normativa de las muestras estudiadas

5.2.3.2.- Elementos mayores

En general las rocas no presentan grandes variaciones en sus composiciones de elementos mayores (Fig 16), sin embargo las muestras del grupo 2 establecido en el



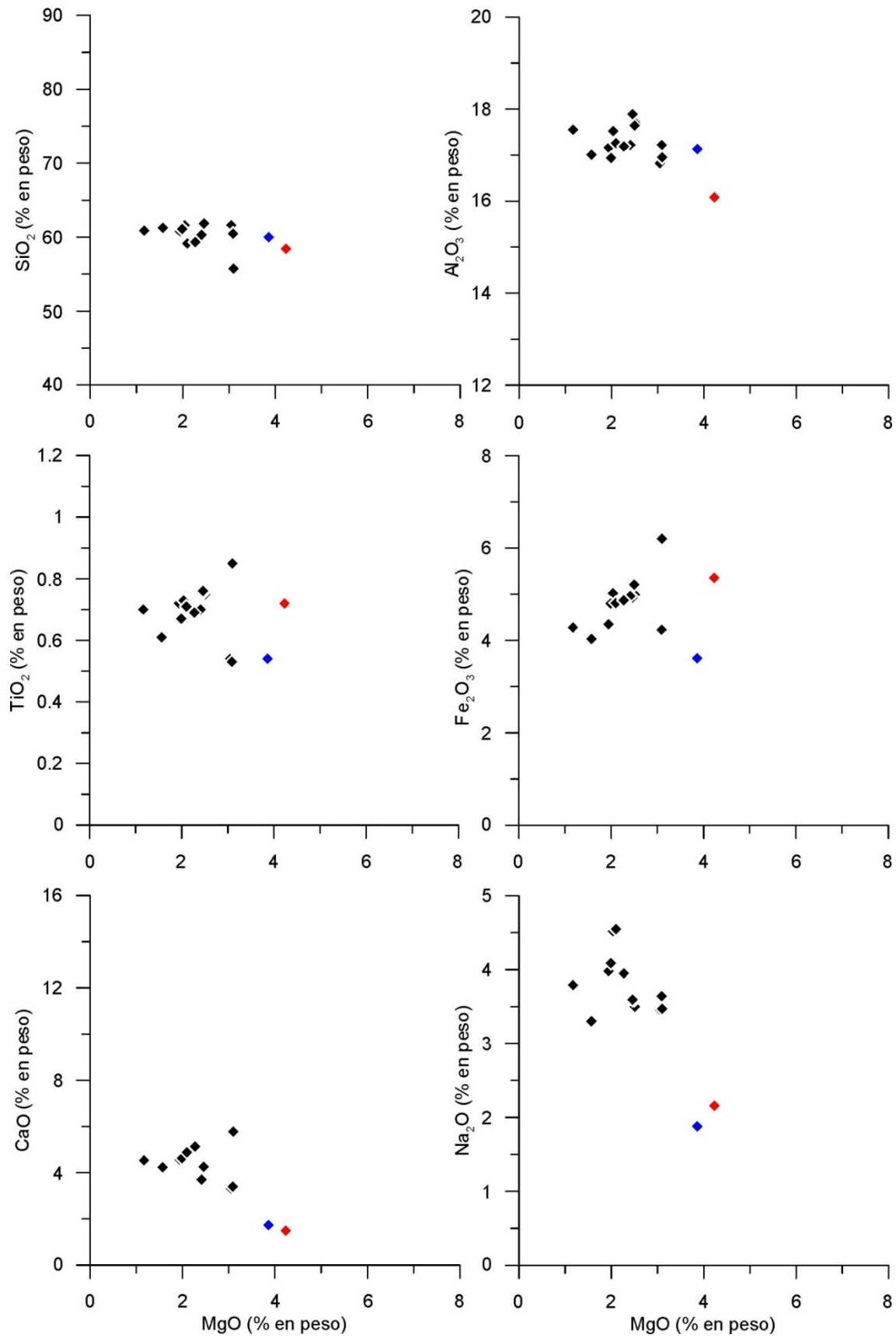


Fig. 16. Contenido en elementos mayores de roca total en muestras de los distintos afloramientos ígneos. La muestra ATU-A3 es representada en azul, la ATU-A8 en rojo, y el resto de muestras en negro

epígrafe anterior presentan contenidos más elevados en Mg y K y más reducidos de Ca y Na que las del grupo 1 (Fig. 16). La muestra ATU-A3 presenta los contenidos más bajos en TiO_2 , MnO y P_2O_5 de las rocas analizadas.

El conjunto de rocas estudiadas muestra una mayor variabilidad en MgO, Fe_2O_3 , CaO, y Na_2O (Fig. 16) que puede estar debida a la fraccionación de anfíbol, biotita y feldespatos.

5.2.3.3.- Elementos traza

El contenido en elementos traza incompatibles normalizados frente al manto primitivo de McDonough & Sun (1995) muestra fuertes anomalías negativas en Nb-Ta y Ti (Fig. 17), que son propias de magmas calcoalcalinos. La fraccionación de los feldespatos (plagioclasa) se ve reflejada en la notable variabilidad del Sr, así como, posiblemente, en la del Rb, Ba y K, aunque en el caso de estos últimos puede estar ligada también a la alteración. El par Zr-Hf también muestra cierta fraccionación posiblemente debida a la presencia de minerales accesorios (apatito, circón). Finalmente, las REE muestran diferente grado de enriquecimiento, coherente con la fraccionación observada en las rocas. Las diferencias entre los dos grupos establecidos anteriormente también se reflejan en los elementos traza, en concreto en Sr y K. Las rocas del grupo 2 tienen una anomalía positiva en K y negativa en Sr, opuestas a las de las rocas del grupo 1, que son coherentes con las diferencias en ortosa y plagioclasa normativas (Tabla 1).

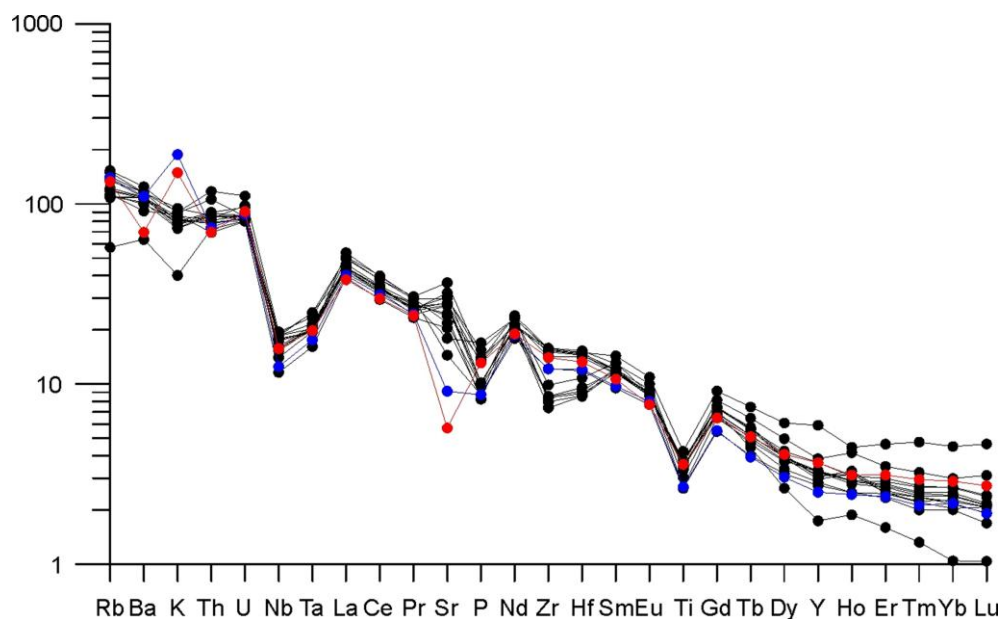


Fig. 17. contenido en elementos traza incompatibles normalizados frente al manto primitivo de McDonough & Sun (1995)

5.3.- Discusión de los principales resultados obtenidos

5.3.1.- Origen y evolución del magmatismo

Las rocas estudiadas tienen una composición similar que varía entre andesitas, traquiandesitas, dacitas y traquidacitas. Se trata de rocas intermedias que están compuestas fundamentalmente por plagioclasa, anfíbol y biotita y, en ocasiones, ortopiroxeno.

Las rocas subvolcánicas presentan una matriz microcristalina compuesta de plagioclasa, opacos, sanidina y cuarzo, mientras que las rocas de la unidad volcánica constan de vidrio y vacuolas. La similitud en la asociación mineral así como en la composición geoquímica (a escala mineral y de roca total) sugiere que todas las rocas estudiadas son cogenéticas.

La mineralogía normativa permite establecer dos grupos (Tabla 1), de forma que las muestras de la unidad volcánica y del afloramiento subvolcánico noroccidental tienen ligeras diferencias composicionales respecto al resto de muestras. Teniendo en cuenta que estas muestras diferentes pertenecen a afloramientos ígneos distintos, uno de ellos volcánico, y además, que se observan algunas relaciones de corte entre materiales subvolcánicos (p. ej. Alpedroches) es razonable suponer que debieron tener lugar varias etapas magmáticas.

La asociación mineral de las rocas estudiadas, con plagioclasa abundante y en algunos casos ortopiroxeno y cuarzo es propia de rocas calcoalcalinas. Esta afinidad es coherente con la presencia de abundante cuarzo normativo y la ausencia de nefelina y olivino normativos (Tabla 1). Además, la composición geoquímica de roca total corresponde a una serie de rocas subalcalinas saturadas en sílice. Las pautas normalizadas de elementos traza incompatibles son típicas de magmas en cuyo origen hay una gran influencia cortical o están relacionados con procesos de subducción.

El conjunto de rocas estudiadas muestra variaciones composicionales ligadas a la fraccionación de sus minerales principales. Por un lado, se han identificado zonaciones composicionales en fenocristales de anfíbol y granate. También se han identificado diferencias en la composición del núcleo de los fenocristales frente a sus bordes, cuando se trata de cristales idiomorfos a subidiomorfos y frente a los microcristales de la matriz. Todas esas variaciones composicionales responden a cambios en la composición del magma calcoalcalino o en las condiciones P-T del mismo.

El anfíbol muestra 3 zonas composicionales. El paso entre la zona 1 (central) y la 2 supone un zonado inverso, puesto que ésta presenta valores de mg^* más elevados. Sin embargo, el paso de la 2 a la 3 (externa) responde a un zonado normal, pasando a valores más bajos de mg^* . De esta manera es posible identificar 2 procesos magmáticos: una recarga de la cámara por un fundido más primitivo y una posterior cristalización fraccionada.

La biotita muestra un zonado inverso entre el centro y el borde de los cristales tanto en el caso de los fenocristales como en microcristales. En los fenocristales la composición evoluciona, de centro a borde, a biotita menos magnesiánica y más rica en Fe^{2+} . En los microcristales sucede lo mismo, pasando de biotitas a flogopitas (menos Mg y más Fe^{2+}).

Esta evolución opuesta a la que presenta el anfíbol puede deberse a la competencia por el Mg y Fe^{2+} durante su cristalización coetánea.

Las plagioclasas presentan fenocristales con zonación oscilatoria, cuyos bordes tienen una composición más evolucionada, coincidente con la de los microcristales. El zonado oscilatorio es frecuentemente explicado por cambios locales en el magma que rodea a los cristales como consecuencia de su crecimiento (Castro, 2015). La composición más evolucionada de los bordes de los fenocristales y los microcristales es consecuencia de la cristalización fraccionada.

El granate también presenta 3 zonas composicionales. La zona 1 pertenece a granates de los enclaves metamórficos asimilados por el magma. Esta distribución junto con su aspecto moteado y parcialmente reabsorbido y su límite alotriomorfo (Fig. 13), sugieren un origen metamórfico. La zona 2 crece como consecuencia del reequilibrio de estos granates al entrar en la cámara magmática. Finalmente, la zona 3 podría representar el crecimiento de este mineral en condiciones ígneas.

En cuanto a las condiciones P-T del magma, las coronas presentes en muchos de los anfíboles indican una situación de desequilibrio brusco en el fundido. En ese sentido, podrían ser consecuencia de un ascenso rápido del fundido hasta su nivel de emplazamiento. Además, la estabilidad de los granates en magmas andesíticos requiere de P elevadas, por lo que su presencia en estas rocas evidencia un ascenso rápido del magma que ha evitado su asimilación en condiciones más superficiales.

5.3.2- Estructura y emplazamiento del magmatismo

5.3.2.1.- Sill subvolcánico

En el apartado anterior se ha demostrado que todos los afloramientos subvolcánicos, a excepción del más noroccidental, presentan las mismas características composicionales. Esto sugiere que podrían ser parte de un mismo sill. Para ello deberán poder ser relacionados estratigráfica y estructuralmente.

Los afloramientos subvolcánicos centrales están dispuestos en discordancia angular sobre la serie silúrica infrayacente plegada y, en general, bajo la serie pérmica, en aparente concordancia (Anexos 1 y 2). Los límites laterales de estos afloramientos son variados: fallas normales o direccionales, contactos no fallados con su roca encajante original o la propia topografía actual. El afloramiento de Alpedroches presenta una situación similar, donde el sill se encuentra al E en contacto con un pequeño afloramiento de rocas ígneas, y al W con la serie pérmica en aparente continuidad.

El único afloramiento en el que el Pérmico surprayacente se encuentra en clara discordancia sobre el cuerpo subvolcánico es el situado al N del afloramiento de La Miñosa. Esta relación geométrica podría deberse a que en este punto el Pérmico y su discontinuidad basal presentan distinta orientación (por ejemplo, por una disposición en *on-lap* del Pérmico sobre un paleorrelieve de los materiales silúricos) o simplemente porque en este afloramiento la morfología de la intrusión no corresponda estrictamente a la de un sill.

Los afloramientos subvolcánicos en los cuales no aflora el Silúrico bajo el sill o el Pérmico sobre el mismo, no pueden correlacionarse de forma directa ni entre sí ni con los anteriores por su posición en la serie. Uno de estos afloramientos es el más oriental del área de estudio. En él se observa el sill en discordancia sobre el Silúrico pero los materiales pérmicos suprayacentes están erosionados. Esta discordancia del sill sobre el Silúrico, por la edad de las rocas que pone en contacto, debe ser nuevamente, la de la base del Pérmico. Este afloramiento representa el bloque levantado de una falla normal que, junto a la erosión, lo separan del afloramiento situado inmediatamente al W. A su vez, este segundo afloramiento representa el bloque levantado de la Falla de Bornova, que pone en contacto el Pérmico sedimentario con el Silúrico, dejando al sill en el bloque W bajo la actual topografía. La estructuración tectónica, la posición en la serie estratigráfica y la composición geoquímica común de los afloramientos más orientales permite, por tanto, relacionarlos espacialmente como integrantes de un mismo sill.

El afloramiento de La Miñosa y el afloramiento más suroccidental del sector, no presentan evidencias estructurales claras que permitan su relación con el resto, pudiendo tratarse de manifestaciones intrusivas aisladas. Sin embargo, sus características composicionales, cartográficas y de contexto geológico, sugieren nuevamente su pertenencia a este gran sill.

En definitiva, todos estos afloramientos de rocas subvolcánicas pueden corresponder a un mismo sill si se atiende a su posición en la serie estratigráfica, disposición estructural y composición similar. Dicho sill afloraría individualizado por sus digitaciones e irregularidades iniciales, deformación posterior y erosión actual.

El emplazamiento de este sill tuvo lugar a favor de la discontinuidad pérmica, favorecido por el contraste mecánico entre los sedimentos silúricos (de mayor resistencia) y los pérmicos (recientemente depositados en el momento de la intrusión).

Finalmente, el afloramiento más noroccidental queda rodeado por la serie Pérmica, la cual no se encuentra afectada por fracturas y presenta un buzamiento uniforme hacia el NE, tanto en los niveles subyacentes como suprayacentes al sill. Esta disposición junto a las pequeñas variaciones composicionales observadas sugieren que este afloramiento pertenece a un segundo sill.

5.2.2.2.- Diques

Los diques estudiados intruyen al sill en el afloramiento de Alpedroches (Fig. 3), por lo que representan una etapa magmática posterior. Además, muestran una orientación preferente N-S (Fig. 4) de lo que se deduce un emplazamiento dominado por una dirección de extensión regional E-W.

5.2.2.3.- Unidad volcánica.

Los diferentes afloramientos de rocas volcánicas constituyen una misma unidad ligeramente plegada (Anexo 1), y afectada y limitada por fallas normales al S. La abundancia de fallas en este sector S parece señalar una zona de ascenso preferente de magma.

Esta unidad está constituida por brechas tobáceas con intercalaciones de cineritas. No se observan rocas sedimentarias ni indicios de desarrollo de paleosuelos, por lo que esta unidad se interpreta como perteneciente a un mismo evento magmático. Este evento tuvo distintas fases, separadas en el registro estratigráfico por las intercalaciones de cineritas entre las sucesiones de brechas tobáceas. Dichas sucesiones de brechas están formadas, a su vez, por varios niveles, evidenciando la presencia de varios pulsos dentro de las fases que constituyen.

La distribución espacial restringida de la unidad se explica, en parte, por la considerable viscosidad de los magmas andesíticos y, por otro lado, al confinamiento lateral de los depósitos.

6.- Conclusions

The Atienza magmatism is formed by sills and dikes of intermediate rocks and a volcanic unit.

Most of the subvolcanic outcrops are isolated parts of a unique entire sill of more than 15 km². Its thickness reaches up to 150 m and decreases to the W. It is intruded between the Silurian and Permian units. The individualized disposition of the outcrops of this sill it is related to the Alpine and by the irregularities of the intrusion.

A second smaller sill has been identified in the western part of the studied area emplaced into the Permian sedimentary sequence. In the eastern outcrop of Alpedroches several N-S-trending dikes intruded the first sill, suggesting several magmatic episodes.

The volcanic unit it is composed by breccias tuffs with intercalations of tuff cinerites. This unit corresponds to a single magmatic event composed by different pulses.

The studied rocks are andesites, trachyandesites, dacites and trachydacites. They show a variable modal assemblage of amphibole, biotite, plagioclase and occasional orthopyroxene phenocrysts. The subvolcanic rocks have a fine-grained matrix composed of plagioclase, sanidine, opaque minerals and quartz. On the other hand, the rocks of the volcanic unit have altered glass with vacuoles. All the studied rocks carry metapelite xenoliths and xenocrystic garnet.

The modal and normative mineral assemblage and the whole-rock data indicate that all samples have a similar composition. This magmatism is calc-alkaline and belongs to the SiO₂-saturated series. Some differences in the normative assemblage and the trace element composition allow to distinguish two compositional groups. The first group corresponds to most of subvolcanic rocks (big sill and dikes) and the second group is formed by the sample of the small sill and the studied volcanic rock.

Primitive mantle normalized trace element patterns indicate a cortical influence in the origin of the magma. The compositional zoning in phenocrysts and the differences in the composition of the microcrysts show a complex evolution of the magmatic plumbing system. This evolution includes magmatic chamber recharge, fractional crystallization and assimilation of crustal xenoliths.

The presence of metapelite xenoliths, garnet xenocrysts and rims in amphibole indicate a rapid ascent of the magma. This suggests that ascent occurred through deeper faults. The thickness of the big sill is highest in its eastern part, close to the main fault of the studied area, the Bornova fault. Thus, a relation between this fault and the ascent of the magma can be established. The discontinuity between the Silurian and Permian was a favorable surface of emplacement of the magma.

7.- Bibliografía

Ancochea, E., Hernán, F. y Vegas, R. (1981): Un marco tectónico para el Vulcanismo de Atienza (Provincia de Guadalajara). *Cuadernos de Geología Ibérica*, 7: 421-430.

Castro, A. (2015): *Petrografía de rocas ígneas y metamórficas*, Paraninfo, Madrid, 280 p.

Droop, G.T.R. (1987): A general equation for estimating Fe^{3+} concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria. *Mineralogical Magazine*, 51(361): 431-435.

Gabaldón, V., Ruiz, P., Bascones, L., Martínez, F. y González, L. (1978): *Mapa geológico de España 1:50000, hoja nº 433 (Atienza) y memoria*. IGME, Madrid. 45 p.

Hernando, S. (1980): Mapa geológico del Pérmico y Triásico de la región Ayllón-Atienza. *Cuadernos de Geología Ibérica*, 6: 21-54.

Hernando, S., Schott, J.J., Thuizat, R. y Montigny, R. (1980): Âge des andésites et des sédiments interstratifiés dans la région d'Atienza (Espagne). Etude stratigraphique, géochronologique et paléomagnétique. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 32: 119-128.

IGN (1995): *Mapa topográfico de España 1:25.000, hoja nº 433-IV (Atienza)*. Instituto Geográfico Nacional, Madrid.

Lago, M., Arranz, E., Pocoví, A., Galé, C. y Gil-Imaz, A. (2004): Lower Permian magmatism of the Iberian Chain, Central Spain, and its relationship to extensional tectonics. *Geological Society of London Special Publication*, 223: 465-490.

Lago, M., Gil, A., Arranz, E., Gale, C., y Pocovi, A. (2005): Magmatism in the intracratonic Central Iberian basins during the Permian: Palaeoenvironmental consequences. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 229: 83– 103

Leake, B.E., Woolley, A.R., Arps, C.E.S., Birch, W.D., Gilbert, M.C., Grice, J.D., Hawthorne, E.C., Kato, A., Kisch, H.J., Krivovichev, V.G., Linthout, K., Laird, J., Mandarino, J., Maresch, W.V., Nickel, E.H., Rock, N.M.S., Schumacher, J.C., Smith, D.C., Stephenson, N.C.N., Ungaretti, L., Whittaker, E.J.W. y Youzhi, G. (1997): Nomenclature of amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on New Minerals and Mineral Names. *European Journal of Mineralogy*, 9(3): 623-651.

Leake, B. E., Woolley, A. R., Birch, W. D., Burke, E., Ferraris, G., Grice, J. D., Hawthorne, F. C., Kisch, H. J., Krivovichev, V. G., Schumacher, J. C., Stephenson, N. & Whittaker, E. (2004). Nomenclature of Amphiboles: Additions and revisions to the International Mineralogical Associations amphibole nomenclature. *American Mineralogist*, 89, 5-6, 883-887.

Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A. y Zanettin, B. (1986): A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, 27(3): 745-750.

Majarena, U., Gil, A., Lago, M., y Galé, C. (2015a): El magmatismo Pérmico del sector de Atienza (extremo NW de la Cordillera Ibérica): nuevos datos petro-estructurales para su interpretación genética. *Geogaceta*, (en prensa).

Majarena, U., Galé, C., Lago, M., Gil-Imaz, A., Ubide, T., y Larrea, P. (2015b): Evolución Magmática de los Anfíboles del Magmatismo de Atienza (Guadalajara). *Macla* 20, Julio'15: 87-88.

Majarena, U., Galé, C., Lago, M., Gil-Imaz, A., Ubide, T., y Larrea, P. (2015c): Los Granates de las Andesitas de Atienza: Consideraciones sobre su origen. *Macla* 20, Julio'15: 89-90.

Martínez Catalán, J.R., Martínez Poyatos, D. y Bea, F. (2004): Dominio del Olo de Sapo. En: *Geología de España* (Vera J.A. ed.). Sociedad Geológica de España e Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 68-78.

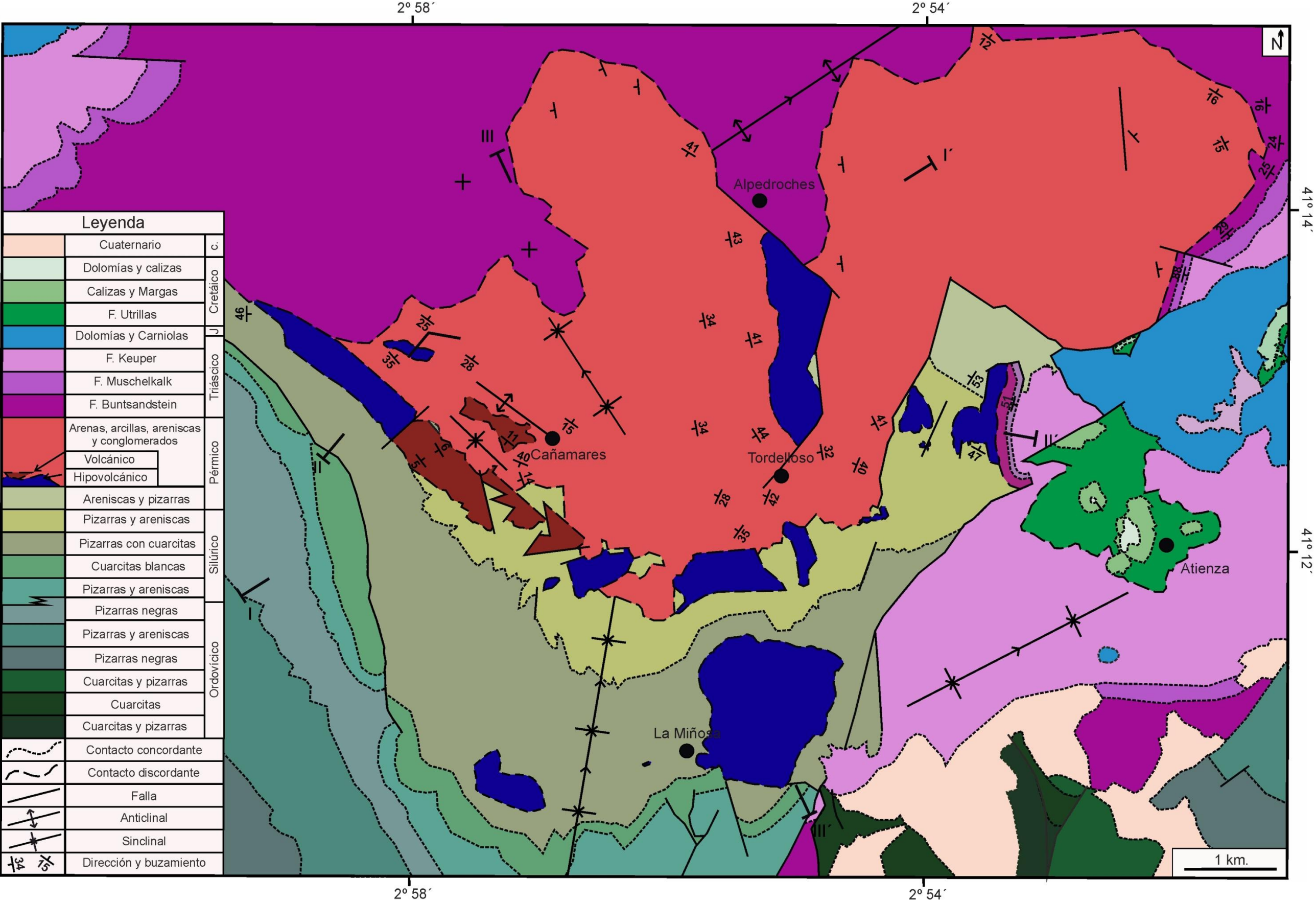
McDonough, W.F. y Sun, S.S. (1995): The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120(3): 223-253.

Pérez Mazario, F. (1990): Estratigrafía de la unidad inferior del Pérmico del sector Atienza-Ujados (Borde Noreste del Sistema Central Español). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 3: 3-4.

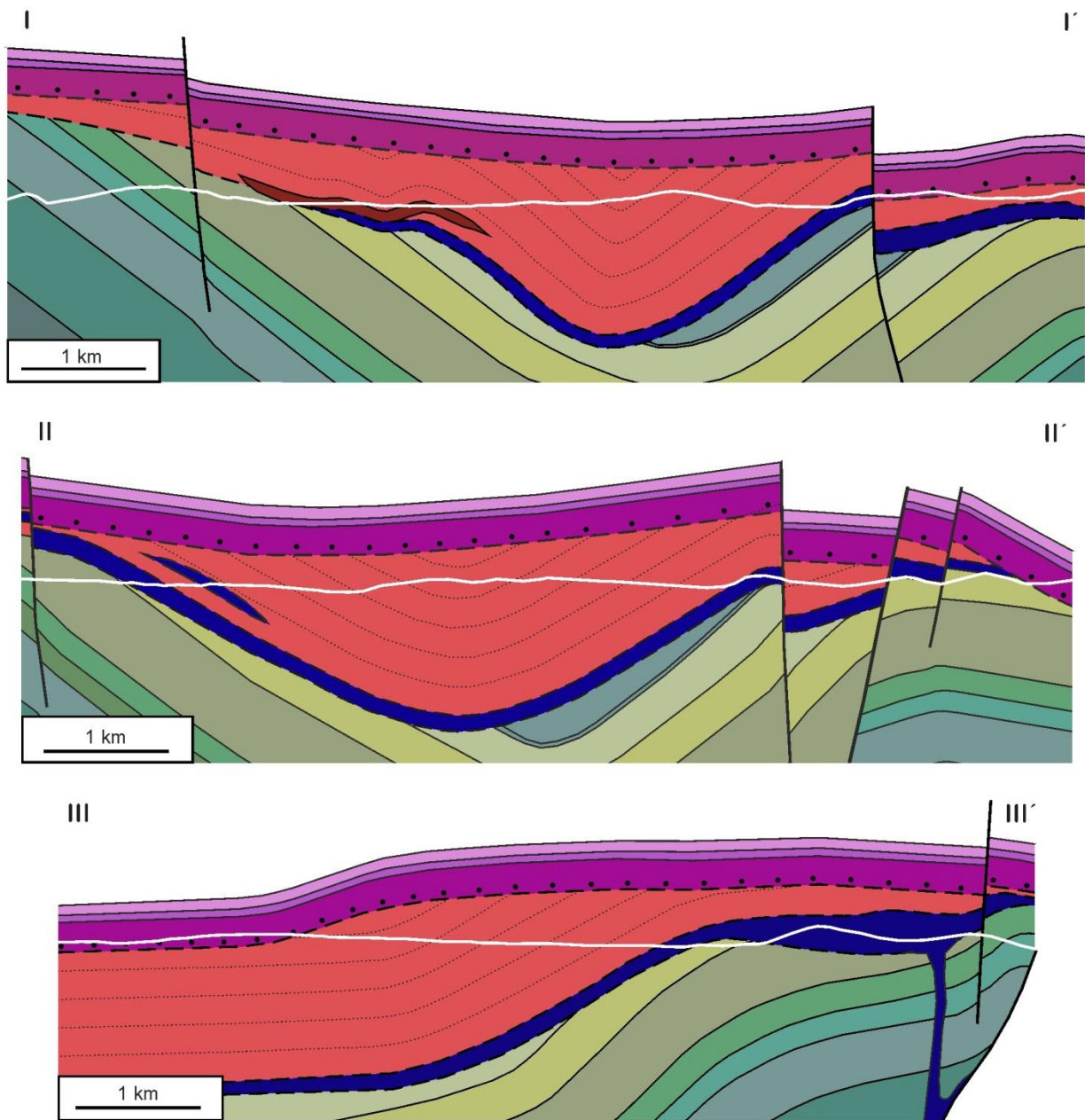
Virgili, C. (1980): Cartografía del Triásico y Pérmico del borde oriental del Sistema Central y Rama Castellana de la Cordillera Ibérica. *Cuadernos de Geología Ibérica*, 6: 13-20.

Winchester, J. A. y Floyd, P.A. (1977): Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20: 325-343.

Anexo 1: Mapa geológico del área de estudio.



Anexo 2: Cortes geológicos realizados.



La traza de estos cortes se muestra en la leyenda del anexo 1. La leyenda es la misma a la utilizada en este anexo.

Anexo 3: Datos analíticos minerales más representativos y su fórmula estructural.

| Nº análisis | 75.00 | 76.00 | 77.00 | 78.00 | 79.00 | 80.00 | 180.00 | 181.00 | 297.00 | 119.00 |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Lámina | ATU-A9 | ATU-A9 | ATU-A9 | ATU-A9 | ATU-A9 | ATU-A9 | ATUA7 | ATUA7 | ATU11 | ATUD1 |
| Mineral | PI | PI | PI | PI | PI | PI | PI | PI | PI | PI |
| SiO2 | 55.84 | 56.25 | 54.68 | 55.59 | 55.26 | 54.16 | 67.86 | 67.83 | 66.03 | 61.52 |
| TiO2 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 |
| Al2O3 | 28.25 | 27.73 | 29.10 | 28.48 | 28.25 | 29.38 | 20.49 | 20.13 | 21.24 | 23.88 |
| Cr2O3 | 0.01 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.03 | 0.00 | 0.00 |
| MgO | 0.03 | 0.00 | 0.03 | 0.01 | 0.02 | 0.00 | 0.02 | 0.02 | 0.04 | 0.07 |
| FeOt | 0.10 | 0.07 | 0.07 | 0.04 | 0.07 | 0.12 | 0.03 | 0.07 | 0.01 | 0.33 |
| NiO | 0.04 | 0.01 | 0.01 | 0.09 | 0.01 | 0.00 | 0.04 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| MnO | 0.00 | 0.06 | 0.01 | 0.00 | 0.06 | 0.04 | 0.00 | 0.03 | 0.01 | 0.00 |
| CaO | 9.52 | 8.97 | 9.97 | 9.51 | 9.27 | 10.71 | 0.00 | 0.01 | 0.28 | 5.55 |
| Na2O | 6.08 | 6.35 | 5.73 | 6.13 | 6.08 | 5.36 | 11.99 | 11.27 | 10.86 | 7.62 |
| K2O | 0.26 | 0.30 | 0.23 | 0.29 | 0.37 | 0.22 | 0.04 | 0.03 | 0.65 | 0.82 |
| BaO | | | | | | | | | | |
| P2O5 | 0.00 | 0.03 | 0.00 | 0.06 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.04 |
| SrO | | | | | | | | | | |
| F | 0.00 | 0.02 | 0.05 | 0.02 | 0.05 | 0.04 | 0.02 | 0.02 | 0.00 | 0.01 |
| Cl | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Total | 100.14 | 99.79 | 99.90 | 100.23 | 99.47 | 100.08 | 100.52 | 99.43 | 99.11 | 99.86 |
| Total real | 100.14 | 99.78 | 99.88 | 100.22 | 99.45 | 100.07 | 100.51 | 99.42 | 99.11 | 99.85 |
| Si | 2.51 | 2.53 | 2.47 | 2.50 | 2.50 | 2.44 | 2.95 | 2.98 | 2.92 | 2.74 |
| Ti | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Al | 1.50 | 1.47 | 1.55 | 1.51 | 1.51 | 1.56 | 1.05 | 1.04 | 1.11 | 1.25 |
| Mg | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Fet | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 |
| Ni | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Mn | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Ca | 0.46 | 0.43 | 0.48 | 0.46 | 0.45 | 0.52 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.27 |
| Na | 0.53 | 0.55 | 0.50 | 0.53 | 0.53 | 0.47 | 1.01 | 0.96 | 0.93 | 0.66 |
| K | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 0.05 |
| Ba | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| F | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Cl | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| sum Z | 4.01 | 4.01 | 4.02 | 4.01 | 4.01 | 4.01 | 4.01 | 4.02 | 4.03 | 4.01 |
| sum X | 1.01 | 1.01 | 1.00 | 1.01 | 1.01 | 1.00 | 1.02 | 0.96 | 0.98 | 0.97 |
| Total | 5.01 | 5.02 | 5.01 | 5.02 | 5.02 | 5.01 | 5.02 | 4.98 | 5.01 | 4.98 |
| An | 45.69 | 43.09 | 48.37 | 45.40 | 44.76 | 51.80 | 0.00 | 0.05 | 1.34 | 27.34 |
| Ab | 52.82 | 55.20 | 50.30 | 52.94 | 53.10 | 46.92 | 99.78 | 99.79 | 94.95 | 67.86 |
| Or | 1.49 | 1.71 | 1.33 | 1.66 | 2.14 | 1.28 | 0.21 | 0.16 | 3.71 | 4.80 |

| Nº análisis | 147 | 195 | 237 | 205 | 331 | 335 | 186 | 202 | 204 | 275 |
|------------------|-------|-------|-------|----------|-------|-------|----------|----------|----------|-------|
| Lámina | AT-13 | AT-13 | AT-13 | ATU-4(1) | ATU11 | ATU11 | ATU-4(1) | ATU-4(1) | ATU-4(1) | ATU11 |
| Mineral | Amp | Amp | Amp | Amp | Amp | Amp | Amp | Amp | Amp | Amp |
| Tipo | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| SiO2 | 41.76 | 41.67 | 43.13 | 41.88 | 40.82 | 41.30 | 43.50 | 43.06 | 42.98 | 42.93 |
| TiO2 | 2.70 | 2.78 | 1.89 | 1.52 | 2.18 | 2.24 | 1.82 | 1.42 | 1.62 | 1.99 |
| Al2O3 | 14.39 | 14.73 | 12.38 | 16.82 | 15.09 | 15.32 | 12.62 | 13.22 | 12.53 | 12.44 |
| Cr2O3 | 0.03 | 0.06 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.03 | 0.05 | 0.02 |
| MgO | 11.98 | 12.03 | 12.31 | 14.11 | 15.78 | 15.38 | 11.47 | 10.61 | 10.99 | 11.68 |
| FeOt | 12.93 | 12.61 | 14.63 | 10.12 | 9.23 | 9.34 | 15.57 | 17.03 | 17.10 | 15.31 |
| NiO | 0.05 | 0.02 | | 0.00 | 0.01 | 0.04 | 0.14 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| MnO | 0.11 | 0.09 | 0.12 | 0.19 | 0.15 | 0.12 | 0.21 | 0.34 | 0.32 | 0.26 |
| CaO | 11.24 | 11.16 | 10.81 | 11.38 | 11.31 | 11.49 | 10.25 | 10.00 | 9.82 | 10.91 |
| Na2O | 2.09 | 2.21 | 1.91 | 2.07 | 2.28 | 2.27 | 1.64 | 1.79 | 1.68 | 1.73 |
| K2O | 0.75 | 0.76 | 0.62 | 0.60 | 0.64 | 0.62 | 0.61 | 0.56 | 0.54 | 0.83 |
| F | 0.15 | 0.13 | 0.15 | 0.18 | 0.11 | 0.00 | 0.11 | 0.07 | 0.11 | 0.09 |
| Cl | 0.06 | 0.04 | 0.08 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.13 | 0.18 | 0.14 | 0.21 |
| Total | 98.26 | 98.28 | 98.04 | 98.92 | 97.65 | 98.15 | 98.12 | 98.29 | 97.93 | 98.39 |
| Total real | 98.18 | 98.22 | 97.95 | 98.83 | 97.60 | 98.14 | 98.05 | 98.22 | 97.85 | 98.31 |
| | | | | | | | | | | |
| Si | 6.09 | 6.07 | 6.30 | 5.94 | 5.85 | 5.89 | 6.35 | 6.30 | 6.31 | 6.29 |
| Al IV | 1.91 | 1.93 | 1.70 | 2.06 | 2.15 | 2.11 | 1.65 | 1.70 | 1.69 | 1.71 |
| Ti | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| sum T | 8.00 | 8.00 | 8.00 | 8.00 | 8.00 | 8.00 | 8.00 | 8.00 | 8.00 | 8.00 |
| Al VI | 0.57 | 0.60 | 0.44 | 0.76 | 0.40 | 0.47 | 0.52 | 0.58 | 0.48 | 0.44 |
| Ti | 0.30 | 0.30 | 0.21 | 0.16 | 0.24 | 0.24 | 0.20 | 0.16 | 0.18 | 0.22 |
| Cr | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 |
| Fe3+ | 0.34 | 0.32 | 0.54 | 0.59 | 0.77 | 0.68 | 0.63 | 0.70 | 0.77 | 0.51 |
| Mg | 2.61 | 2.61 | 2.68 | 2.98 | 3.37 | 3.27 | 2.49 | 2.31 | 2.40 | 2.55 |
| Fe2+ | 1.18 | 1.16 | 1.13 | 0.51 | 0.22 | 0.34 | 1.15 | 1.25 | 1.16 | 1.27 |
| Ni | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Mn | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Ca | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| sum C | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 |
| Mg | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Fe ²⁺ | 0.06 | 0.06 | 0.12 | 0.10 | 0.12 | 0.10 | 0.12 | 0.14 | 0.17 | 0.09 |
| Ni | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Mn | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.03 | 0.04 | 0.04 | 0.03 |
| Ca | 1.76 | 1.74 | 1.69 | 1.73 | 1.74 | 1.76 | 1.60 | 1.57 | 1.54 | 1.71 |
| Na | 0.17 | 0.19 | 0.18 | 0.14 | 0.12 | 0.13 | 0.24 | 0.25 | 0.25 | 0.17 |
| sum B (M4) | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 |
| Ca | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Na | 0.42 | 0.44 | 0.36 | 0.42 | 0.51 | 0.50 | 0.23 | 0.25 | 0.23 | 0.32 |
| K | 0.14 | 0.14 | 0.11 | 0.11 | 0.12 | 0.11 | 0.11 | 0.10 | 0.10 | 0.15 |
| Ba | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| sum A | 0.56 | 0.58 | 0.48 | 0.53 | 0.63 | 0.61 | 0.34 | 0.36 | 0.33 | 0.48 |
| Total | 15.56 | 15.58 | 15.48 | 15.53 | 15.63 | 15.61 | 15.34 | 15.36 | 15.33 | 15.48 |
| mg* | 62.08 | 62.81 | 59.81 | 71 | 75 | 74 | 56 | 52 | 53 | 57 |

| Analysis Sample Mineral | 231 ATU4-2 Px | 232 ATU4-2 Px | 233 ATU4-2 Px | 235 ATU4-2 Px | 241 ATU4-2 Px | 242 ATU4-2 Px | 243 ATU4-2 Px | 244 ATU4-2 Px | 245 ATU4-2 Px |
|-------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| SiO2 | 50.74 | 51.11 | 50.74 | 50.04 | 51.18 | 50.40 | 50.58 | 50.80 | 51.44 |
| TiO2 | 0.13 | 0.09 | 0.04 | 0.12 | 0.06 | 0.11 | 0.05 | 0.09 | 0.05 |
| Al2O3 | 0.85 | 0.56 | 0.63 | 1.18 | 0.34 | 0.63 | 0.38 | 0.66 | 0.48 |
| Cr2O3 | 0.00 | 0.02 | 0.03 | 0.00 | 0.03 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.02 |
| MgO | 17.51 | 17.06 | 17.12 | 17.36 | 17.63 | 17.64 | 17.93 | 17.85 | 18.06 |
| FeOt | 29.44 | 29.94 | 29.42 | 29.31 | 29.03 | 29.41 | 29.18 | 29.21 | 28.93 |
| NiO | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| MnO | 0.67 | 0.68 | 0.60 | 0.49 | 0.50 | 0.62 | 0.54 | 0.53 | 0.73 |
| CaO | 0.51 | 0.50 | 0.52 | 0.50 | 0.70 | 0.68 | 0.76 | 0.57 | 0.61 |
| Na2O | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.03 | 0.00 | 0.00 |
| K2O | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.00 |
| F | 0.05 | 0.04 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Cl | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Total | 99.94 | 100.02 | 99.17 | 99.06 | 99.51 | 99.51 | 99.49 | 99.75 | 100.33 |
| Total real | 99.92 | 100.00 | 99.16 | 99.06 | 99.50 | 99.51 | 99.49 | 99.75 | 100.33 |
| Si | 1.96 | 1.98 | 1.97 | 1.95 | 1.98 | 1.95 | 1.95 | 1.96 | 1.97 |
| Al IV | 0.04 | 0.02 | 0.03 | 0.05 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 0.03 | 0.02 |
| Fe3+ | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.03 | 0.01 | 0.01 |
| sum T | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 |
| Al VI | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Fe3+ | 0.03 | 0.01 | 0.02 | 0.05 | 0.01 | 0.04 | 0.05 | 0.04 | 0.03 |
| Cr | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Ti | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Mg | 0.97 | 0.98 | 0.97 | 0.95 | 0.98 | 0.95 | 0.95 | 0.96 | 0.97 |
| Fe2+ | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Ni | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Mn | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| sum M1 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Mg | 0.04 | 0.00 | 0.02 | 0.06 | 0.03 | 0.07 | 0.08 | 0.06 | 0.06 |
| Fe2+ | 0.92 | 0.96 | 0.94 | 0.90 | 0.92 | 0.88 | 0.87 | 0.89 | 0.89 |
| Ni | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Mn | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| Ca | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.02 |
| Na | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| K | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| sum M2 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Total | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 |
| En | 50.36 | 49.31 | 49.86 | 50.42 | 50.80 | 50.45 | 51.02 | 51.08 | 51.41 |
| Fs | 48.58 | 49.66 | 49.06 | 48.54 | 47.74 | 48.16 | 47.44 | 47.74 | 47.36 |
| Wo | 1.06 | 1.03 | 1.08 | 1.04 | 1.46 | 1.39 | 1.54 | 1.18 | 1.24 |

| Analysis | 117 | 118 | 91 | 92 | 303 | 304 | 209 | 210 | 180 | 181 |
|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Sample | AT-12 | AT-12 | ATU-A9 | ATU-A9 | ATUD3 | ATUD3 | AT-13 | AT-13 | ATU-D2. | ATU-D2. |
| Mineral | Biotita | Biotita | Biotita | Biotita | Biotita | Biotita | Biotita | Biotita | Biotita | Biotita |
| Tipo | Ignea | Ignea | Ignea | Ignea | Ignea | Ignea | Ignea | Ignea | Ignea | Ignea |
| Subtipo | Tipo 1 | Tipo 1 | Tipo 2 | Tipo 2 | Tipo 3 | Tipo 3 | Tipo 4 | Tipo 4 | Tipo 5 | Tipo 5 |
| SiO2 | 35.52 | 34.90 | 34.83 | 35.41 | 36.03 | 36.14 | 35.21 | 34.65 | 35.59 | 35.73 |
| TiO2 | 4.10 | 4.12 | 4.16 | 4.17 | 3.89 | 4.04 | 4.30 | 3.69 | 4.32 | 4.72 |
| Al2O3 | 15.65 | 16.05 | 16.35 | 16.63 | 15.48 | 15.44 | 16.06 | 16.01 | 15.33 | 14.39 |
| Cr2O3 | | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.05 | 0.00 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.01 |
| MgO | 11.67 | 11.59 | 14.91 | 16.60 | 14.91 | 15.35 | 14.43 | 14.04 | 16.15 | 16.36 |
| FeOt | 17.60 | 17.99 | 13.79 | 11.46 | 13.97 | 13.50 | 16.30 | 17.90 | 14.49 | 14.10 |
| NiO | | 0.05 | 0.01 | 0.06 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.09 | 0.06 | 0.00 |
| MnO | 0.03 | 0.06 | 0.08 | 0.00 | 0.05 | 0.05 | 0.16 | 0.15 | 0.11 | 0.06 |
| CaO | 0.02 | | 0.01 | 0.01 | 0.05 | 0.01 | 0.15 | 0.40 | 0.09 | 0.09 |
| Na2O | 0.57 | 0.55 | 0.41 | 0.45 | 0.53 | 0.37 | 0.55 | 0.46 | 0.54 | 0.48 |
| K2O | 8.97 | 9.02 | 8.43 | 8.59 | 8.85 | 9.10 | 7.15 | 6.06 | 9.00 | 9.15 |
| F | 0.21 | 0.44 | 1.18 | 1.11 | 1.57 | 1.29 | 0.24 | 0.22 | 1.92 | 1.92 |
| Cl | 0.18 | 0.15 | 0.22 | 0.23 | 0.19 | 0.24 | 0.18 | 0.17 | 0.20 | 0.25 |
| Total | 94.52 | 94.94 | 94.39 | 94.74 | 95.58 | 95.54 | 94.81 | 93.86 | 97.82 | 97.26 |
| Total real | 94.39 | 94.72 | 93.84 | 94.23 | 94.87 | 94.94 | 94.66 | 93.73 | 96.96 | 96.40 |
| Si | 2.72 | 2.67 | 2.62 | 2.62 | 2.68 | 2.68 | 2.65 | 2.64 | 2.60 | 2.62 |
| Al IV | 1.28 | 1.33 | 1.38 | 1.38 | 1.32 | 1.32 | 1.35 | 1.36 | 1.32 | 1.24 |
| Fe3+ | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Ti | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| sum Z | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 3.92 | 3.87 |
| Al VI | 0.13 | 0.11 | 0.06 | 0.07 | 0.03 | 0.03 | 0.07 | 0.07 | 0.00 | 0.00 |
| Fe3+ | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.18 | 0.00 | 0.00 |
| Ti | 0.24 | 0.24 | 0.23 | 0.23 | 0.22 | 0.23 | 0.24 | 0.21 | 0.24 | 0.26 |
| Mg | 1.33 | 1.32 | 1.67 | 1.83 | 1.65 | 1.70 | 1.62 | 1.59 | 1.76 | 1.79 |
| Fe2+ | 1.13 | 1.16 | 0.88 | 0.72 | 0.88 | 0.85 | 1.03 | 0.96 | 0.90 | 0.88 |
| Mn | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 |
| Cr | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Ni | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 |
| sum Y | 2.83 | 2.84 | 2.85 | 2.85 | 2.79 | 2.81 | 2.97 | 3.03 | 2.91 | 2.94 |
| Ca | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.03 | 0.01 | 0.01 |
| Na | 0.08 | 0.08 | 0.06 | 0.06 | 0.08 | 0.05 | 0.08 | 0.07 | 0.08 | 0.07 |
| K | 0.87 | 0.88 | 0.81 | 0.81 | 0.84 | 0.86 | 0.69 | 0.59 | 0.84 | 0.86 |
| Ba | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| sum X | 0.96 | 0.96 | 0.87 | 0.88 | 0.92 | 0.92 | 0.78 | 0.69 | 0.92 | 0.93 |
| F | 0.05 | 0.11 | 0.28 | 0.26 | 0.37 | 0.30 | 0.06 | 0.05 | 0.44 | 0.45 |
| Cl | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.03 |
| sum A | 0.07 | 0.13 | 0.31 | 0.29 | 0.39 | 0.33 | 0.08 | 0.08 | 0.47 | 0.48 |
| Total | 7.79 | 7.80 | 7.72 | 7.73 | 7.71 | 7.72 | 7.75 | 7.72 | 7.75 | 7.74 |
| Fe2+/(Fe2++Mg) | 0.46 | 0.47 | 0.34 | 0.28 | 0.35 | 0.33 | 0.39 | 0.38 | 0.34 | 0.33 |
| Al IV | 1.28 | 1.33 | 1.38 | 1.38 | 1.32 | 1.32 | 1.35 | 1.36 | 1.32 | 1.24 |

| Analysis | 92 | 95 | 97 | 98 | 2 | 3 | 4 | 3 | 5 | 111 |
|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Sample | AT-12 | AT-12 | AT-12 | AT-12 | AT-E1. | AT-E1. | AT-E1. | AT-6 | AT-6 | AT6 |
| Mineral | Biotita | Biotita | Biotita | Biotita | Biotita | Biotita | Biotita | Biotita | Biotita | Biotita |
| Tipo | Metam | Metam | Metam | Metam | Metam | Metam | Metam | Metam | Metam | Metam |
| Subtipo | Tipo 1 | Tipo 1 | Tipo 1 | Tipo 1 | Tipo 2 | Tipo 2 | Tipo 2 | Tipo 3 | Tipo 3 | Tipo 3 |
| SiO2 | 35.31 | 35.55 | 34.49 | 34.93 | 35.98 | 35.98 | 35.72 | 35.78 | 35.90 | 34.46 |
| TiO2 | 4.42 | 4.30 | 4.18 | 4.10 | 3.50 | 3.62 | 4.24 | 4.54 | 4.48 | 4.25 |
| Al2O3 | 16.07 | 15.67 | 15.93 | 15.91 | 15.78 | 15.70 | 15.39 | 15.14 | 14.78 | 15.90 |
| Cr2O3 | 0.08 | 0.02 | 0.06 | 0.08 | 0.02 | 0.06 | 0.04 | | 0.00 | 0.06 |
| MgO | 11.23 | 11.31 | 11.06 | 11.38 | 13.31 | 13.55 | 13.19 | 11.58 | 11.62 | 11.25 |
| FeOt | 17.96 | 17.69 | 17.61 | 17.35 | 16.07 | 16.00 | 16.28 | 18.02 | 17.87 | 18.79 |
| NiO | 0.08 | 0.01 | | 0.07 | 0.11 | 0.00 | 0.02 | 0.02 | 0.04 | 0.00 |
| MnO | | 0.07 | 0.03 | 0.08 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.04 | 0.05 | 0.11 |
| CaO | | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.04 | 0.06 |
| Na2O | 0.63 | 0.58 | 0.57 | 0.61 | 0.80 | 0.86 | 0.81 | 0.72 | 0.73 | 0.46 |
| K2O | 9.00 | 8.79 | 9.08 | 8.93 | 8.59 | 8.43 | 8.34 | 8.52 | 8.32 | 7.79 |
| F | 0.55 | 0.82 | 0.46 | 1.13 | 0.40 | 0.34 | 0.31 | 0.33 | 0.22 | 1.19 |
| Cl | 0.13 | 0.12 | 0.15 | 0.16 | 0.14 | 0.10 | 0.15 | 0.21 | 0.20 | 0.26 |
| Total | 95.45 | 94.96 | 93.63 | 94.77 | 94.73 | 94.64 | 94.51 | 94.90 | 94.24 | 94.60 |
| Total real | 95.19 | 94.58 | 93.40 | 94.26 | 94.52 | 94.48 | 94.34 | 94.72 | 94.11 | 94.04 |
| Si | 2.68 | 2.70 | 2.67 | 2.67 | 2.72 | 2.72 | 2.71 | 2.73 | 2.75 | 2.64 |
| Al IV | 1.32 | 1.30 | 1.33 | 1.33 | 1.28 | 1.28 | 1.29 | 1.27 | 1.25 | 1.36 |
| Fe3+ | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Ti | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| sum Z | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 |
| Al VI | 0.12 | 0.11 | 0.13 | 0.10 | 0.13 | 0.11 | 0.08 | 0.09 | 0.08 | 0.07 |
| Fe3+ | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Ti | 0.25 | 0.25 | 0.24 | 0.24 | 0.20 | 0.21 | 0.24 | 0.26 | 0.26 | 0.24 |
| Mg | 1.27 | 1.28 | 1.28 | 1.30 | 1.50 | 1.53 | 1.49 | 1.31 | 1.33 | 1.28 |
| Fe2+ | 1.15 | 1.14 | 1.15 | 1.12 | 1.02 | 1.02 | 1.04 | 1.15 | 1.15 | 1.22 |
| Mn | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 |
| Cr | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Ni | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| sum Y | 2.80 | 2.78 | 2.80 | 2.77 | 2.85 | 2.87 | 2.86 | 2.82 | 2.83 | 2.83 |
| Ca | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 |
| Na | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.12 | 0.13 | 0.12 | 0.11 | 0.11 | 0.07 |
| K | 0.87 | 0.85 | 0.90 | 0.87 | 0.83 | 0.81 | 0.81 | 0.83 | 0.81 | 0.76 |
| Ba | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| sum X | 0.96 | 0.94 | 0.98 | 0.96 | 0.95 | 0.94 | 0.92 | 0.94 | 0.92 | 0.84 |
| F | 0.13 | 0.20 | 0.11 | 0.27 | 0.10 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.05 | 0.29 |
| Cl | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.03 |
| sum A | 0.15 | 0.21 | 0.13 | 0.29 | 0.11 | 0.09 | 0.09 | 0.11 | 0.08 | 0.32 |
| Total | 7.76 | 7.72 | 7.79 | 7.73 | 7.80 | 7.80 | 7.78 | 7.75 | 7.75 | 7.67 |
| Fe2+/(Fe2++Mg) | 0.47 | 0.47 | 0.47 | 0.46 | 0.41 | 0.40 | 0.41 | 0.47 | 0.46 | 0.49 |
| Al IV | 1.32 | 1.30 | 1.33 | 1.33 | 1.28 | 1.28 | 1.29 | 1.27 | 1.25 | 1.36 |

| Element | 185 | 186 | 188 | 189 | 106 | 107 | 108 | 16 | 17 | 18 |
|-------------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Sample | AT-E3.. | AT-E3.. | AT-E3.. | AT-E3.. | AT-12 | AT-12 | AT-12 | AT-6 | AT-6 | AT-6 |
| Mineral | Grt | Grt | Grt | Grt | Grt | Grt | Grt | Grt | Grt | Grt |
| Tipo | Zona 1 | Zona 1 | Zona 1 | Zona 1 | Zona 2 | Zona 2 | Zona 2 | Zona 3 | Zona 3 | Zona 3 |
| SiO2 | 37.64 | 37.82 | 38.52 | 37.60 | 38.89 | 39.26 | 39.06 | 38.33 | 38.32 | 38.30 |
| TiO2 | 0.00 | 0.02 | 0.07 | 0.05 | 0.20 | 0.11 | 0.23 | 0.27 | 0.23 | 0.10 |
| Al2O3 | 22.53 | 21.86 | 21.69 | 22.11 | 22.07 | 22.10 | 22.15 | 22.11 | 21.63 | 22.19 |
| Cr2O3 | 0.01 | 0.04 | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 0.09 | 0.05 | 0.00 | 0.00 | 0.02 |
| Fe2O3 | 0.00 | 0.10 | 0.00 | 0.00 | 1.05 | 0.00 | 1.41 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| MgO | 4.74 | 4.77 | 4.18 | 4.86 | 9.68 | 9.66 | 10.40 | 4.93 | 4.97 | 5.45 |
| FeO | 31.42 | 32.73 | 30.64 | 30.81 | 24.51 | 23.58 | 23.24 | 27.62 | 27.83 | 27.22 |
| NiO | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.07 | 0.00 | 0.01 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.04 |
| MnO | 1.49 | 1.43 | 2.12 | 1.92 | 0.17 | 0.16 | 0.21 | 1.41 | 1.42 | 1.50 |
| CaO | 2.01 | 1.91 | 2.48 | 2.24 | 3.64 | 4.47 | 3.79 | 5.31 | 5.55 | 5.33 |
| Na2O | 0.03 | 0.02 | 0.06 | 0.06 | 0.03 | 0.01 | 0.03 | 0.04 | 0.03 | 0.02 |
| Total | 99.88 | 100.72 | 99.75 | 99.71 | 100.27 | 99.45 | 100.58 | 100.03 | 99.99 | 100.15 |
| Si | 5.95 | 5.96 | 6.09 | 5.96 | 5.93 | 6.00 | 5.91 | 5.99 | 6.01 | 5.97 |
| Ti | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.01 |
| Al | 4.20 | 4.06 | 4.04 | 4.13 | 3.97 | 3.98 | 3.95 | 4.07 | 4.00 | 4.08 |
| Cr | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Fe3+ | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.12 | 0.00 | 0.17 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Mg | 1.12 | 1.12 | 0.98 | 1.15 | 2.20 | 2.20 | 2.35 | 1.15 | 1.16 | 1.27 |
| Fe2+ | 4.15 | 4.33 | 4.05 | 4.08 | 3.25 | 3.02 | 3.10 | 3.61 | 3.65 | 3.55 |
| Ni | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Mn | 0.20 | 0.19 | 0.28 | 0.26 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.19 | 0.19 | 0.20 |
| Ca | 0.34 | 0.32 | 0.42 | 0.38 | 0.59 | 0.73 | 0.61 | 0.89 | 0.93 | 0.89 |
| Na | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| Total | 15.96 | 16.01 | 15.89 | 15.98 | 16.12 | 15.99 | 16.17 | 15.95 | 15.97 | 15.98 |
| mg# | 21.21 | 20.58 | 19.55 | 21.94 | 40.39 | 42.21 | 43.06 | 24.15 | 24.17 | 26.31 |
| Piropo | 19 | 19 | 17 | 20 | 36 | 37 | 39 | 20 | 20 | 21 |
| Andradita | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 |
| Almandino | 71 | 73 | 71 | 70 | 54 | 50 | 51 | 62 | 62 | 60 |
| Uvarovita | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Espesartina | 3 | 3 | 5 | 4 | 0 | 0 | 0 | 3 | 3 | 3 |
| Grosularia | 6 | 5 | 7 | 6 | 7 | 12 | 6 | 15 | 16 | 15 |

| Analysis | 141 | 33 | 237 | 238 | 239 | 267 | 318 | 377 | 174 | 175 |
|------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| Sample | ATU7(3) | ATU12 | ATU4-2 | ATU4-2 | ATU4-2 | ATU4-2 | ATUD3 | ATUD3 | AT-E3.. | AT-E3.. |
| Mineral | Ap | Ap | Ap | Ap | Ap | Ap | Ap | Ap | Ap | Ap |
| SiO2 | 0.00 | 0.12 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| TiO2 | 0.06 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.04 | 0.06 | 0.09 | 0.00 | 0.03 |
| Al2O3 | 0.00 | 0.14 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.03 | 0.00 | 0.00 |
| Cr2O3 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| MgO | 0.14 | 0.23 | 0.10 | 0.11 | 0.09 | 0.03 | 0.48 | 0.57 | 0.14 | 0.23 |
| FeOt | 0.54 | 0.73 | 0.27 | 0.38 | 0.73 | 0.50 | 1.29 | 1.58 | 0.36 | 0.58 |
| NiO | 0.01 | 0.07 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.05 | 0.03 | 0.01 | 0.00 | 0.00 |
| MnO | 0.05 | 0.00 | 0.13 | 0.10 | 0.11 | 0.07 | 0.19 | 0.20 | 0.08 | 0.14 |
| CaO | 55.36 | 55.35 | 55.34 | 55.37 | 55.42 | 54.61 | 51.79 | 52.48 | 55.68 | 55.39 |
| Na2O | 0.01 | 0.07 | 0.00 | 0.04 | 0.02 | 0.02 | 0.13 | 0.11 | 0.13 | 0.12 |
| K2O | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.02 | 0.10 | 0.12 | 0.00 | 0.05 |
| BaO | | | | | | | | | | |
| P2O5 | 42.50 | 41.64 | 42.38 | 41.83 | 41.82 | 41.55 | 42.01 | 41.19 | 41.73 | 41.97 |
| F | 2.07 | 2.76 | 2.07 | 2.20 | 2.11 | 2.10 | 2.69 | 1.74 | 2.01 | 2.16 |
| Cl | 0.72 | 1.25 | 0.93 | 1.00 | 1.28 | 1.17 | 1.68 | 2.03 | 1.05 | 1.05 |
| Total | 101.46 | 102.35 | 101.22 | 101.05 | 101.59 | 100.15 | 100.48 | 100.15 | 101.18 | 101.72 |
| Total real | 100.43 | 100.91 | 100.14 | 99.90 | 100.42 | 99.00 | 98.96 | 98.96 | 100.09 | 100.57 |

| Analysis | 9 | 10 | 12 | 14 | 154 | 155 | 181 | 182 | 235 | 46 |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|
| Sample | AT-6 | AT-6 | AT-6 | AT-6 | AT-13 | AT-13 | AT-13 | AT-13 | AT-13 | ATU12 |
| Mineral | Ilm | Ilm | Ilm | Ilm | Ilm | Ilm | Ilm | Ilm | Ilm | Ilm |
| SiO2 | | | | | | 0.03 | 0.03 | 0.01 | 0.04 | 0.02 |
| TiO2 | 53.97 | 54.88 | 53.10 | 54.13 | 51.98 | 49.14 | 49.70 | 49.04 | 49.69 | 50.98 |
| Al2O3 | 0.26 | 0.18 | 0.29 | 0.21 | 0.23 | 0.07 | 0.04 | 0.08 | 0.08 | 0.10 |
| Cr2O3 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.04 | 0.10 | 0.06 | 0.00 | 0.11 | 0.04 |
| MgO | 1.71 | 1.77 | 1.86 | 1.66 | 3.58 | 0.85 | 0.98 | 0.95 | 0.82 | 2.32 |
| FeOt | 43.48 | 43.02 | 44.38 | 44.15 | 44.46 | 49.35 | 50.09 | 49.65 | 49.19 | 45.96 |
| NiO | 0.05 | | | | 0.05 | 0.00 | 0.02 | | 0.14 | 0.00 |
| MnO | 0.49 | 0.41 | 0.55 | 0.42 | 0.34 | 0.30 | 0.38 | 0.44 | 0.46 | 0.36 |
| CaO | 0.02 | 0.01 | 0.02 | 0.03 | 0.27 | 0.05 | 0.04 | 0.04 | 0.07 | 0.20 |
| Na2O | | | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0.04 | 0.03 | 0.00 | 0.03 |
| K2O | | | | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.02 | | | 0.00 |
| BaO | | | | | | | | | | |
| P2O5 | 0.00 | | | 0.00 | 0.01 | 0.01 | | 0.00 | 0.04 | 0.07 |
| SrO | | | | | | | | | | |
| F | 0.02 | | 0.07 | | 0.01 | 0.02 | 0.07 | | | 0.00 |
| Cl | | 0.02 | | | 0.01 | 0.01 | 0.01 | | | 0.00 |
| Total | 100.01 | 100.31 | 100.29 | 100.62 | 101.00 | 99.94 | 101.46 | 100.24 | 100.66 | 100.09 |
| Total real | 100.00 | 100.31 | 100.26 | 100.62 | 100.99 | 99.93 | 101.43 | 100.24 | 100.66 | 100.09 |
| Si | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Al | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Fe3+ | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.10 | 0.15 | 0.15 | 0.16 | 0.14 | 0.10 |
| Cr | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Ti | 1.01 | 1.02 | 0.99 | 1.00 | 0.95 | 0.92 | 0.92 | 0.92 | 0.93 | 0.95 |
| Mg | 0.06 | 0.06 | 0.07 | 0.06 | 0.13 | 0.03 | 0.04 | 0.04 | 0.03 | 0.09 |
| Fe2+ | 0.90 | 0.89 | 0.91 | 0.91 | 0.80 | 0.88 | 0.88 | 0.87 | 0.88 | 0.85 |
| Ni | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Mn | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| Ca | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 |
| Na | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| K | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Total | 1.99 | 1.98 | 2.00 | 1.99 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 |

Anexo 4: Datos analíticos de roca total y minerales normativos.

| Referencia | AT-06 dacita | AT-07 andesita | AT-08 andesita | AT-11 dacita | AT-12 dacita | AT-13 andesita | ATU-4(1) dacita | ATU-A2 dacita |
|--------------------------------|-----------------|-------------------|-------------------|-----------------|-----------------|-------------------|--------------------|------------------|
| SiO ₂ | 61.89 | 61.79 | 61.85 | 60.81 | 61.27 | 61.59 | 61.10 | 61.64 |
| TiO ₂ | 0.75 | 0.76 | 0.76 | 0.72 | 0.61 | 0.73 | 0.67 | 0.54 |
| Al ₂ O ₃ | 17.70 | 17.64 | 17.89 | 17.16 | 17.01 | 17.52 | 16.94 | 16.82 |
| Fe ₂ O ₃ | 4.99 | 5.21 | 4.93 | 4.35 | 4.03 | 5.02 | 4.80 | 4.21 |
| MnO | 0.18 | 0.18 | 0.19 | 0.08 | 0.04 | 0.07 | 0.07 | 0.03 |
| MgO | 2.51 | 2.50 | 2.46 | 1.94 | 1.57 | 2.04 | 1.99 | 3.05 |
| CaO | 4.30 | 4.23 | 4.25 | 4.57 | 4.23 | 4.60 | 4.62 | 3.31 |
| Na ₂ O | 3.50 | 3.59 | 3.59 | 3.98 | 3.30 | 4.52 | 4.09 | 3.46 |
| K ₂ O | 2.12 | 2.11 | 2.22 | 2.60 | 2.57 | 2.23 | 2.31 | 2.46 |
| P ₂ O ₅ | 0.21 | 0.20 | 0.21 | 0.20 | 0.18 | 0.21 | 0.28 | 0.17 |
| LOI | 1.48 | 1.53 | 1.42 | 3.34 | 4.84 | 1.17 | 2.11 | 3.42 |
| Total | 99.63 | 99.74 | 99.77 | 99.75 | 99.65 | 99.70 | 98.98 | 99.11 |
| mg* | 0.53 | 0.52 | 0.53 | 0.50 | 0.47 | 0.48 | 0.49 | 0.62 |
| Rb | 71.41 | 66.18 | 71.02 | 89.82 | 92.06 | 73.54 | 80.11 | 82.12 |
| Cs | 1.57 | 1.96 | 1.68 | 4.57 | 8.40 | 2.94 | 2.99 | 4.62 |
| Sr | 562.25 | 540.47 | 546.41 | 434.02 | 287.82 | 640.03 | 727.30 | 475.90 |
| Ba | 719.05 | 672.96 | 705.45 | 762.57 | 821.04 | 719.94 | 769.60 | 716.70 |
| Sc | 7.74 | 7.58 | 7.60 | 8.78 | 4.54 | 6.94 | 7.09 | 6.98 |
| V | 76.74 | 76.31 | 75.85 | 72.66 | 34.76 | 73.58 | 61.48 | 50.37 |
| Cr | 33.61 | 34.41 | 34.23 | 24.53 | 16.46 | 23.62 | 94.98 | 70.34 |
| Co | 9.99 | 10.90 | 10.04 | 10.20 | 7.71 | 9.56 | 9.83 | 9.18 |
| Ni | 10.63 | 8.42 | 8.27 | 9.51 | 6.22 | 7.12 | 3.98 | <MDL |
| Cu | 22.24 | 6.97 | 22.37 | 11.82 | 9.82 | 3.90 | 13.52 | 21.07 |
| Zn | 106.88 | 136.20 | 101.31 | 89.89 | 72.25 | 71.41 | 97.16 | 48.16 |
| Ga | 23.92 | 24.17 | 24.16 | 22.96 | 23.78 | 23.27 | 25.03 | 25.20 |
| Y | 13.14 | 13.34 | 13.10 | 16.55 | 7.49 | 12.77 | 15.77 | 14.26 |
| Nb | 12.22 | 11.59 | 11.74 | 12.83 | 11.45 | 12.22 | 12.38 | 9.23 |
| Ta | 0.75 | 0.73 | 0.72 | 0.87 | 0.72 | 0.80 | 0.92 | 0.73 |
| Zr | 89.80 | 88.13 | 89.54 | 103.88 | 83.81 | 77.50 | 166.30 | 149.90 |
| Hf | 2.71 | 2.51 | 2.58 | 3.06 | 2.44 | 2.42 | 4.33 | 3.99 |
| Mo | 0.94 | 1.02 | 1.00 | 0.78 | 0.50 | 1.52 | | |
| Sn | 2.37 | 2.61 | 2.99 | 2.51 | 2.57 | 2.53 | 1.62 | 1.65 |
| Tl | 0.33 | 0.31 | 0.31 | 0.42 | 0.42 | 0.33 | | |
| Pb | 47.14 | 42.91 | 62.77 | 17.62 | 19.93 | 15.62 | 22.36 | 22.48 |
| U | 1.75 | 1.73 | 1.71 | 2.25 | 1.73 | 1.75 | 1.94 | 1.99 |
| Th | 7.07 | 6.86 | 6.85 | 9.39 | 8.47 | 7.09 | 7.18 | 6.60 |
| La | 28.79 | 26.78 | 28.55 | 33.00 | 34.72 | 28.84 | 32.61 | 30.11 |
| Ce | 58.37 | 54.29 | 57.19 | 66.90 | 66.43 | 57.93 | 63.61 | 59.04 |
| Pr | 6.65 | 6.16 | 6.47 | 7.63 | 7.66 | 6.57 | 7.76 | 7.14 |
| Nd | 26.25 | 23.98 | 25.37 | 29.43 | 29.88 | 25.70 | 29.99 | 26.99 |
| Sm | 4.78 | 4.67 | 4.95 | 5.34 | 4.91 | 4.74 | 5.26 | 4.63 |

| | | | | | | | | |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Eu | 1.35 | 1.33 | 1.34 | 1.35 | 1.43 | 1.33 | 1.54 | 1.40 |
| Gd | 4.03 | 4.06 | 4.04 | 4.43 | 3.78 | 4.01 | 4.09 | 3.52 |
| Tb | 0.56 | 0.56 | 0.57 | 0.64 | 0.44 | 0.55 | 0.56 | 0.48 |
| Dy | 2.68 | 2.65 | 2.73 | 3.35 | 1.78 | 2.62 | 2.86 | 2.51 |
| Ho | 0.49 | 0.47 | 0.49 | 0.62 | 0.28 | 0.47 | 0.46 | 0.43 |
| Er | 1.12 | 1.10 | 1.08 | 1.53 | 0.70 | 1.09 | 1.31 | 1.26 |
| Tm | 0.16 | 0.15 | 0.15 | 0.22 | 0.09 | 0.16 | 0.19 | 0.18 |
| Yb | 0.98 | 0.90 | 0.90 | 1.32 | 0.46 | 0.95 | 1.17 | 1.18 |
| Lu | 0.14 | 0.14 | 0.14 | 0.21 | 0.07 | 0.13 | 0.16 | 0.16 |
| Quartz | 19 | 18 | 18 | 14 | 20 | 12 | 14 | 20 |
| Plagioclase | 51 | 51 | 51 | 57 | 51 | 60 | 58 | 47 |
| Orthoclase | 13 | 13 | 13 | 16 | 16 | 13 | 14 | 15 |
| Corundum | 2 | 2 | 2 | 0 | 2 | 0 | 0 | 3 |
| Hypersthene | 13 | 13 | 12 | 10 | 9 | 11 | 11 | 13 |
| Ilmenite | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Magnetite | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

| Referencia | ATU-A3 traquidacita | ATU-A8 andesita | ATU-A9 dacita | ATU-A10 andesita | ATU-A12 benmoreita | ATU-A13 dacita | ATU-D1 benmoreita | ATU-D2 andesita |
|--------------------------------|------------------------|--------------------|------------------|---------------------|-----------------------|-------------------|----------------------|--------------------|
| SiO ₂ | 59.99 | 58.43 | 60.48 | 55.73 | 60.30 | 60.88 | 59.14 | 59.34 |
| TiO ₂ | 0.54 | 0.72 | 0.53 | 0.85 | 0.70 | 0.70 | 0.71 | 0.69 |
| Al ₂ O ₃ | 17.13 | 16.08 | 17.22 | 16.95 | 17.22 | 17.55 | 17.26 | 17.19 |
| Fe ₂ O ₃ | 3.61 | 5.35 | 4.23 | 6.20 | 4.96 | 4.28 | 4.81 | 4.87 |
| MnO | 0.03 | 0.06 | 0.03 | 0.10 | 0.08 | 0.05 | 0.05 | 0.07 |
| MgO | 3.86 | 4.23 | 3.09 | 3.10 | 2.41 | 1.17 | 2.10 | 2.27 |
| CaO | 1.73 | 1.49 | 3.39 | 5.78 | 3.70 | 4.53 | 4.88 | 5.13 |
| Na ₂ O | 1.88 | 2.16 | 3.64 | 3.47 | 4.95 | 3.79 | 4.55 | 3.95 |
| K ₂ O | 5.44 | 4.31 | 2.53 | 1.16 | 2.35 | 2.73 | 2.34 | 2.33 |
| P ₂ O ₅ | 0.18 | 0.27 | 0.18 | 0.35 | 0.28 | 0.32 | 0.27 | 0.29 |
| LOI | 4.37 | 5.72 | 3.43 | 5.35 | 1.95 | 2.77 | 2.62 | 2.66 |
| Total | 98.76 | 98.82 | 98.75 | 99.04 | 98.90 | 98.77 | 98.73 | 98.79 |
| mg* | 0.71 | 0.64 | 0.62 | 0.53 | 0.53 | 0.38 | 0.50 | 0.51 |
| Rb | 83.84 | 79.69 | 67.95 | 34.45 | 65.04 | 85.05 | 64.96 | 67.73 |
| Cs | 5.91 | 2.82 | 3.61 | 2.21 | 2.36 | 3.50 | 2.04 | 1.88 |
| Sr | 181.50 | 113.30 | 407.60 | 357.50 | 488.90 | 594.20 | 559.20 | 605.30 |
| Ba | 727.10 | 459.50 | 602.10 | 419.50 | 724.20 | 765.10 | 711.50 | 656.60 |
| Sc | 7.17 | 7.98 | 6.77 | 12.78 | 7.07 | 5.79 | 6.59 | 6.83 |
| V | 50.20 | 68.56 | 48.32 | 97.07 | 61.26 | 57.50 | 56.04 | 61.02 |
| Cr | 44.61 | 15.01 | 50.49 | 39.39 | 53.50 | 62.56 | 43.08 | 55.24 |
| Co | 11.57 | 9.63 | 7.72 | 12.99 | 8.94 | 7.62 | 8.73 | 8.65 |
| Ni | <MDL | <MDL | <MDL | 5.06 | 3.39 | <MDL | <MDL | <MDL |
| Cu | 33.42 | 11.42 | 11.81 | 23.29 | 12.73 | 37.64 | 14.21 | 12.32 |
| Zn | 62.48 | 80.23 | 40.43 | 135.50 | 77.39 | 75.30 | 71.57 | 76.47 |
| Ga | 22.44 | 20.24 | 21.24 | 23.18 | 21.73 | 22.81 | 22.99 | 21.27 |
| Y | 10.79 | 15.73 | 11.78 | 25.39 | 13.99 | 12.25 | 14.17 | 13.95 |
| Nb | 8.23 | 10.36 | 7.63 | 12.15 | 10.59 | 10.29 | 10.39 | 10.08 |
| Ta | 0.65 | 0.73 | 0.60 | 0.93 | 0.78 | 0.76 | 0.77 | 0.75 |
| Zr | 127.30 | 147.20 | 127.90 | 164.50 | 158.30 | 162.20 | 165.30 | 161.70 |
| Hf | 3.41 | 3.76 | 3.35 | 4.24 | 4.10 | 4.19 | 4.23 | 4.12 |
| Mo | | | | | | | | |
| Sn | 1.11 | 1.48 | 1.31 | 1.82 | 0.95 | 0.83 | 0.99 | 1.44 |
| Tl | | | | | | | | |
| Pb | 17.59 | 10.44 | 18.79 | 8.69 | 15.48 | 19.72 | 13.78 | 19.65 |
| U | 1.78 | 1.84 | 1.62 | 1.64 | 1.74 | 1.64 | 1.69 | 1.65 |
| Th | 5.89 | 5.56 | 5.54 | 5.80 | 6.48 | 6.89 | 6.28 | 6.26 |
| La | 26.01 | 24.60 | 25.24 | 27.64 | 28.98 | 32.16 | 28.31 | 27.82 |
| Ce | 52.46 | 49.95 | 49.40 | 55.63 | 56.58 | 63.70 | 55.37 | 54.23 |
| Pr | 6.23 | 6.10 | 5.93 | 7.13 | 6.98 | 7.54 | 6.83 | 6.69 |
| Nd | 23.40 | 23.73 | 22.41 | 28.86 | 26.90 | 29.05 | 26.60 | 25.97 |
| Sm | 3.95 | 4.33 | 3.86 | 5.82 | 4.81 | 4.89 | 4.80 | 4.67 |
| Eu | 1.23 | 1.18 | 1.18 | 1.68 | 1.37 | 1.43 | 1.36 | 1.33 |
| Gd | 3.00 | 3.52 | 2.97 | 4.98 | 3.75 | 3.63 | 3.78 | 3.64 |
| Tb | 0.39 | 0.50 | 0.40 | 0.74 | 0.51 | 0.46 | 0.51 | 0.50 |
| Dy | 2.05 | 2.74 | 2.14 | 4.10 | 2.64 | 2.28 | 2.65 | 2.54 |

| | | | | | | | | |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Ho | 0.36 | 0.47 | 0.37 | 0.66 | 0.43 | 0.37 | 0.43 | 0.42 |
| Er | 1.04 | 1.37 | 1.08 | 2.03 | 1.22 | 1.02 | 1.20 | 1.18 |
| Tm | 0.14 | 0.20 | 0.15 | 0.32 | 0.17 | 0.14 | 0.17 | 0.16 |
| Yb | 0.96 | 1.27 | 1.01 | 1.99 | 1.10 | 0.89 | 1.06 | 1.05 |
| Lu | 0.13 | 0.18 | 0.14 | 0.31 | 0.15 | 0.11 | 0.14 | 0.14 |
| Quartz | 18 | 19 | 17 | 13 | 9 | 16 | 9 | 12 |
| Plagioclase | 25 | 26 | 49 | 60 | 61 | 55 | 61 | 58 |
| Orthoclase | 34 | 27 | 16 | 7 | 14 | 17 | 14 | 14 |
| Corundum | 6 | 6 | 3 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Diopside | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1 |
| Hypersthene | 15 | 18 | 13 | 16 | 12 | 8 | 10 | 11 |
| Ilmenite | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Magnetite | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Apatite | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |